

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

COMPORTAMENTO DO CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO  
REFORÇADO COM FIBRAS SOB ELEVADAS TEMPERATURAS: REVISÃO  
SISTEMÁTICA DA LITERATURA

ARTHUR BARREIRA DA ROCHA MAFRA

JUIZ DE FORA

2026

COMPORTAMENTO DO CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO  
REFORÇADO COM FIBRAS SOB ELEVADAS TEMPERATURAS: REVISÃO  
SISTEMÁTICA DA LITERATURA

ARTHUR BARREIRA DA ROCHA MAFRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Coordenação do Curso de Engenharia Civil da  
Universidade Federal de Juiz de Fora, como  
requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Estruturas

Orientadora: Paula de Oliveira Ribeiro

Juiz de Fora  
Faculdade de Engenharia da UFJF  
2026

COMPORTAMENTO DO CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO  
REFORÇADO COM FIBRAS SOB ELEVADAS TEMPERATURAS: REVISÃO  
SISTEMÁTICA DA LITERATURA

ARTHUR BARREIRA DA ROCHA MAFRA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com a Resolução Nº 01/2018 do Colegiado do Curso de Engenharia Civil, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 03/07/2026

Por:

 Documento assinado digitalmente  
**PAULA DE OLIVEIRA RIBEIRO**  
Data: 11/07/2026 10:01:52-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Profª. D.Sc. Paula de Oliveira Ribeiro  
Universidade Federal de Juiz de Fora

 Documento assinado digitalmente  
**LAHIS SOUZA DE ASSIS**  
Data: 11/07/2026 13:08:50-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Profª. D.Sc. Lahis Souza de Assis  
Universidade Federal de Juiz de Fora

 Documento assinado digitalmente  
**RODOLFO DE AZEVEDO PALHARES**  
Data: 11/07/2026 18:38:00-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. D.Sc. Rodolfo de Azevedo Palhares  
Universidade Federal de Juiz de Fora

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, que me permitiu ter determinação durante toda a minha jornada acadêmica. Agradeço também à minha família, especialmente aos meus pais, Rafael e Andréa, que sempre me apoiaram e me incentivaram para que eu pudesse cursar a universidade em outra cidade e chegar até aqui. À minha irmã, Helena, por todo o carinho e incentivo. À minha avó, Alice, por toda ajuda e fé em mim. Ao meu falecido avô, Rocha, que sempre foi uma grande inspiração para mim. Aos meus amigos que compartilharam essa experiência comigo e me ajudaram em diversos momentos da Graduação em Engenharia Civil. À minha orientadora, Paula, cuja orientação e dedicação foram essenciais para a concepção e desenvolvimento deste trabalho. Aos meus professores, que contribuíram para que eu pudesse acumular conhecimentos e evoluir para me tornar um engenheiro. À Universidade Federal de Juiz de Fora, por me proporcionar um ensino de qualidade e oportunidades que foram essenciais para minha formação. Por fim, agradeço a todos aqueles que fizeram parte da minha jornada e contribuíram direta ou indiretamente para este momento. Muito obrigado!

## RESUMO

O concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras (em inglês, *Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete*, UHPFRC) é um material promissor para a construção moderna, já que possui resistência mecânica e durabilidade superiores aos concretos convencionais. No entanto, apesar do desenvolvimento de diversas pesquisas, ainda não há um completo entendimento acerca das suas propriedades e comportamento quando exposto a elevadas temperaturas, o qual é totalmente dependente das fibras utilizadas. Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica dos estudos mais recentes sobre este tema, focando nas propriedades mecânicas, alterações microestruturais e resistência ao deslocamento explosivo do compósito quando aquecido, de acordo com as fibras presentes na sua matriz. Além disso, também foi realizada uma discussão acerca da adição de fibras naturais e recicladas ao concreto, a fim de reduzir seu impacto ambiental. Para alcançar estes objetivos, foram pesquisados artigos no catálogo da *Web of Science*, publicados nos últimos 5 anos, que passaram por diversas etapas de filtragem para remover aqueles em desacordo com o objetivo do trabalho, até que restaram 27 estudos que foram utilizados na revisão. Os resultados das análises mostraram que a resistência mecânica do UHPFRC é muito influenciada pelas fibras de aço, as mais empregadas atualmente, mas que não são capazes de prevenir o deslocamento explosivo (*spalling*) sozinhas, de modo que a solução mais usual são as fibras híbridas, sobretudo aço--sintéticas, que aumentam a porosidade e reduzem a tensão interna do material pelo efeito sinérgico dos diferentes tipos e concentrações de fibras. Ao final, concluiu-se que, entre as fibras sintéticas, a mais eficiente é o polipropileno, pois possui menor ponto de fusão e maior coeficiente de dilatação térmica, prevenindo o *spalling* de maneira eficiente, além de auxiliar na melhora das propriedades mecânicas. Ademais, percebeu-se que as fibras naturais e recicladas são promissoras para prevenir o *spalling* sem comprometer sua eficiência mecânica, embora haja a necessidade de mais pesquisas.

**Palavras-chave:** UHPFRC; UHPC; elevadas temperaturas; fibras; *spalling*; propriedades mecânicas.

## ABSTRACT

The ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) is a promising material for modern construction as it exhibits superior mechanical strength and durability compared to conventional concrete. However, despite the development of numerous studies, there is still no complete understanding of its properties and behavior when exposed to elevated temperatures, which are highly dependent on the fibers incorporated into the material. Therefore, the present study aims to provide a literature review of the most recent research on this topic, focusing on the mechanical properties, microstructural changes, and resistance to explosive spalling of the composite under high-temperature exposure, according to the types of fibers present in its matrix. Furthermore, a discussion was conducted regarding the incorporation of natural and recycled fibers into concrete in order to reduce its environmental impact. To achieve these objectives, articles published in the last five years were retrieved from the Web of Science database and subjected to several filtering stages to exclude studies that did not align with the scope of this work. As a result, 27 studies were selected and included in the review. The analysis revealed that the mechanical performance of UHPFRC is highly influenced by steel fibers, which are currently the most widely used reinforcement. However, steel fibers alone are not capable of preventing explosive spalling. Consequently, the most common solution is the use of hybrid fiber systems, especially combinations of steel and synthetic fibers, which increase porosity and reduce internal stresses through the synergistic effects of different fiber types and concentrations. Finally, it was concluded that among synthetic fibers, polypropylene fibers are the most effective, because of their lower melting point and higher coefficient of thermal expansion. These characteristics enable them to efficiently prevent spalling while also contributing to improvements in mechanical properties. In addition, natural and recycled fibers were identified as promising alternatives for mitigating spalling without compromising its mechanical performance, although further research is still required.

**Keywords:** UHPFRC; UHPC; elevated temperatures; fibers; spalling; mechanical properties.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Exemplo de pilar de UHPC após sofrer deslocamento explosivo a temperatura elevada. ....                                                                                     | 16 |
| Figura 2 - Aparência das fibras de aço e sintéticas.....                                                                                                                               | 18 |
| Figura 3 - Fluxograma indicando a metodologia aplicada na seleção dos artigos utilizados na pesquisa. ....                                                                             | 20 |
| Figura 4 - Relação dos anos de publicação dos artigos selecionados.....                                                                                                                | 21 |
| Figura 5 - Quantidade de artigos por país entre os selecionados.....                                                                                                                   | 22 |
| Figura 6 - Tipos de fibra utilizados nos artigos: a) combinações; b) individualmente. ....                                                                                             | 23 |
| Figura 7 - Relação das revistas científicas nas quais os artigos foram publicados. ....                                                                                                | 24 |
| Figura 8 - Resistências residuais à compressão do UHPC com fibras de aço a diferentes temperaturas.....                                                                                | 25 |
| Figura 9 – Resultados de resistência residual à compressão relativa, obtidas do estudo de Lin <i>et al.</i> (2024a), do UHPC com várias combinações de fibras de aço e sintéticas..... | 26 |
| Figura 10 - Resistências residuais à compressão dos corpos de prova cúbicos. ....                                                                                                      | 27 |
| Figura 11 - Resistências residuais à tração nas pesquisas de Hung; Yulianti; Agrawal (2024) e Agrawal <i>et al.</i> (2025). ....                                                       | 29 |
| Figura 12 - Resistências residuais à tração no estudo de Abadel; Khan; Masmoudi (2023). ....                                                                                           | 29 |
| Figura 13 - Resistências residuais à flexão obtidas nos estudos selecionados. ....                                                                                                     | 31 |
| Figura 14 - Módulos de elasticidade residuais relativos das amostras prismáticas de UHPC com diferentes fibras sintéticas do estudo de Lin <i>et al.</i> (2024a). ....                 | 32 |
| Figura 15 - Módulos de elasticidade residuais das amostras prismáticas de UHPC. ....                                                                                                   | 34 |
| Figura 16 - Morfologia da zona de aderência entre a matriz cimentícia do UHPC e as fibras de aço a elevadas temperaturas.....                                                          | 36 |
| Figura 17 - Morfologia microscópica do UHPC com várias fibras após 200 °C. ....                                                                                                        | 37 |
| Figura 18 - Distribuição e tamanho dos poros das amostras de UHPC com combinação de fibras de aço e sintéticas e sem as últimas (U). ....                                              | 38 |
| Figura 19 - Distribuição volumétrica dos poros no UHPC a elevadas temperaturas. ....                                                                                                   | 39 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 20 - Comportamento do deslocamento explosivo das amostras cúbicas de UHPC com diferentes fibras sintéticas a elevadas temperaturas. ....                                                                                                                                                   | 41 |
| Figura 21 - Comportamento do deslocamento explosivo das amostras prismáticas (com comprimento de 300 mm e 400 mm, respectivamente) de UHPC com diferentes fibras sintéticas. ....                                                                                                                 | 42 |
| Figura 22 - Resultados dos testes de deslocamento explosivo das amostras com diferentes concentrações (% em volume) de fibras de aço (SF) e polietileno (PEF) a 1000 °C. ....                                                                                                                     | 44 |
| Figura 23 - Observação do deslocamento em amostras de UHPC sem fibras e com fibras híbridas de aço (ST) e basalto (BF) a elevadas temperaturas. ....                                                                                                                                              | 45 |
| Figura 24 - Amostras de UHPC no forno: (a) antes do aquecimento; (b) após exposição a 600 °C, sendo os corpos de prova atrás aqueles com MJ. ....                                                                                                                                                 | 47 |
| Figura 25 – Imagens SEM indicando a degradação das fibras de aço e bambu conforme o aumento da temperatura de exposição. ....                                                                                                                                                                     | 48 |
| Figura 26 – Imagem SEM destacando o espaço tangencial induzido pela retração da fibra de sisal e os seus lúmens. ....                                                                                                                                                                             | 49 |
| Figura 27 - Resistência residual à compressão das amostras de UHPC sem fibras ( <i>plain</i> ) e com diferentes concentrações (% em volume) de fibras híbridas de aço (SF) e bambu (BF). ....                                                                                                     | 50 |
| Figura 28 - Resistência residual à flexão do UHPC sem fibras ( <i>plain</i> ) e com diferentes concentrações (% em volume) de fibras de aço (SF) e bambu (BF) a diferentes temperaturas: a) resistência à flexão absoluta; b) resistência à flexão relativa (normalizada como 100% a 25 °C). .... | 50 |
| Figura 29 - Resistência mecânica residual, a 800 °C dos corpos de prova com diferentes concentrações (% em volume) de fibras híbridas de aço (ST) e sisal (SI): a) compressão; b) flexão e tenacidade. ....                                                                                       | 51 |
| Figura 30 - Resistência mecânica residual dos corpos de prova com 2 % de fibras de aço e 0,5 % de MJ (U-H) e sem as últimas (U-S) em temperaturas de 25 °C (ambiente – A) a 600 °C: a) compressão; b) flexão. ....                                                                                | 51 |
| Figura 31 – Resistência residual à compressão e módulo de elasticidade residual do UHPC com aço reciclado e polipropileno. ....                                                                                                                                                                   | 52 |

Figura 32 - Resistência residual à compressão após o aquecimento dos corpos de prova de UHPC com concentrações de 0, 4 (0,3 %), 8 (0,5 %) e 12 kg/m<sup>3</sup> (0,8 %) de fibras de kenaf (K): (a) 0; (b) 2 (0,2 %); (c) 4 (0,4 %); (d) 6 kg/m<sup>3</sup> (0,7 %) de fibras de PP reciclado (P).. 54

Figura 33 - Resistência residual à flexão após o aquecimento dos corpos de prova de UHPC com concentrações de 0, 4 (0,3 %), 8 (0,5 %) e 12 kg/m<sup>3</sup> (0,8 %) de fibras de kenaf (K): (a) 0; (b) 2 (0,2 %); (c) 4 (0,4 %); (d) 6 kg/m<sup>3</sup> (0,7 %) de fibras de PP reciclado (P). ..... 55

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Porcentagens de fibras das amostras cúbicas das pesquisas.....                                                                                                                                                        | 27 |
| Tabela 2 - Teores de fibras das amostras utilizadas nos ensaios de tração. ....                                                                                                                                                  | 28 |
| Tabela 3 - Porcentagens de fibras das amostras prismáticas utilizadas nos ensaios de flexão.<br>.....                                                                                                                            | 30 |
| Tabela 4 - Porcentagens de fibras das amostras prismáticas utilizados nos ensaios para<br>determinar o módulo de elasticidade residual. ....                                                                                     | 33 |
| Tabela 5 – Resultados dos testes de Lin <i>et al.</i> (2024b) para o <i>spalling</i> do UHPC com<br>diferentes fibras sintéticas a elevadas temperaturas. ....                                                                   | 41 |
| Tabela 6 - Aparência das amostras de UHPC após exposição a altas temperaturas. Obs.: SF6<br>e SF15 referem-se às fibras de aço de 6 mm e 15 mm de comprimento, respectivamente. .                                                | 43 |
| Tabela 7 - Performance em relação ao <i>spalling</i> das amostras de UHPC cúbicas e prismáticas,<br>com diferentes concentrações (% em volume) de fibras de aço (SF) e bambu (BF) do artigo<br>de Zhao <i>et al.</i> (2025)..... | 46 |
| Tabela 8 - Aparência visual das amostras de UHPC com aço e sisal após aquecimento a 800<br>°C.....                                                                                                                               | 46 |
| Tabela 9 - Comportamento do deslocamento explosivo dos corpos de prova de UHPC com<br>fibras de PP reciclado e kenaf expostos a elevadas temperaturas. ....                                                                      | 53 |

## LISTA DE SIGLAS

|        |                                                         |
|--------|---------------------------------------------------------|
| a/c    | Água/cimento                                            |
| HRWR   | <i>High-range water reducer</i>                         |
| MHS    | <i>Macro end hooked steel fibre</i>                     |
| MIP    | <i>Mercury intrusion porosimetry</i>                    |
| MJ     | Micro juta                                              |
| MSS    | <i>Micro straight steel fibre</i>                       |
| NY     | Nylon                                                   |
| PAN    | Poliacrilonitrila                                       |
| PET    | Polietileno tereftalato                                 |
| PP     | Polipropileno                                           |
| PVA    | Acetato de polivinila                                   |
| SEM    | <i>Scanning Electron Microscope</i>                     |
| SFRP   | <i>Synergistic flame-retardant Polymer</i>              |
| UHPC   | <i>Ultra-High Performance Concrete</i>                  |
| UHPFRC | <i>Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete</i> |
| ZTI    | Zona de Transição Interfacial                           |

## SUMÁRIO

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....                                                          | 12 |
| 1.1. OBJETIVOS.....                                                          | 13 |
| 1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....                                           | 13 |
| 2. REFERENCIAL TEÓRICO .....                                                 | 15 |
| 2.1. UHPC: CONCEITO E PROPRIEDADES .....                                     | 15 |
| 2.2. O FENÔMENO DO DESPLACAMENTO EXPLOSIVO ( <i>SPALLING</i> ) .....         | 15 |
| 2.3. MECANISMOS DE AÇÃO DAS FIBRAS.....                                      | 17 |
| 3. METODOLOGIA .....                                                         | 19 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                              | 21 |
| 4.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....                                              | 21 |
| 4.2. COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO .....                                       | 24 |
| 4.2.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....                                        | 24 |
| 4.2.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....                                            | 28 |
| 4.2.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO .....                                            | 30 |
| 4.2.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE .....                                          | 31 |
| 4.3. ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS E POROSIDADE .....                          | 34 |
| 4.4. PREVENÇÃO DO <i>SPALLING</i> E A SINERGIA DAS FIBRAS HÍBRIDAS .....     | 39 |
| 4.5. MATERIAIS SUSTENTÁVEIS E ALTERNATIVOS .....                             | 45 |
| 5. CONCLUSÃO .....                                                           | 56 |
| REFERÊNCIAS .....                                                            | 58 |
| APÊNDICE A - Informações sobre os artigos selecionados para a pesquisa ..... | 62 |

## 1. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda por materiais com excelente performance na indústria da construção moderna, o concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras (em inglês, *Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete*, UHPFRC, que por simplicidade e por coerência com a literatura recente, neste trabalho será denominado UHPC) surgiu no início da década de 1990 (Gao *et al.*, 2024). Desde a primeira construção de uma estrutura de UHPC no mundo, em Sherbrooke, Canadá, em 1997, esse material vem sendo largamente utilizado em diversas obras de Engenharia, como pontes, estradas, bases militares e reforços estruturais (Gao *et al.*, 2024).

O UHPC despertou o interesse de pesquisadores ao redor do mundo devido às suas excepcionais propriedades mecânicas e durabilidade, muito superiores àquelas do concreto convencional (Khan *et al.*, 2024). O UHPC apresenta resistência à compressão ultrapassando 120 MPa, resistência à tração superior à 6 MPa, baixa permeabilidade e microestrutura densa, atribuídas à sua baixa relação água-cimento e à alta compactação das partículas (Khan *et al.*, 2024; Ridha, 2024). Além disso, diferente do concreto convencional, o UHPC normalmente é dosado pelo método de empacotamento de partículas e possui acréscimo de aditivos, adições e fibras e cura a vapor em altas temperaturas (Ren; Gao; Zhang, 2022).

Entretanto, devido à sua alta densidade e baixa porosidade, o UHPC é muito mais vulnerável ao fenômeno do deslocamento explosivo (*spalling*) do que o concreto convencional, pois em casos de incêndio ou outras situações com temperaturas elevadas, a rápida vaporização da água livre e vinculada ao UHPC gera pressão de vapor que não pode ser aliviada, gerando uma falha imediata (Ma *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2025). Este tipo de falha catastrófica não apenas prejudica a integridade estrutural, mas também pode ocasionar reações em cadeia, provocando acidentes graves (Zhao *et al.*, 2025). Desse modo, muitos pesquisadores adotam fibras híbridas de aço com polímeros, que possuem baixo ponto de fusão, como polipropileno (PP) e acetato de polivinila (PVA), para aumentar a resistência ao *spalling* e as propriedades mecânicas residuais do UHPC, pois o emprego exclusivo de fibras de aço não impede o deslocamento explosivo (Ren; Gao; Zhang, 2022; Khan *et al.*, 2024).

Embora haja significantes avanços nas pesquisas sobre o UHPC submetido a elevadas temperaturas, sobretudo acerca do *spalling* e da resistência residual à compressão, ainda há poucos estudos acerca das resistências residuais à tração e à flexão, do módulo de elasticidade residual, da degradação microestrutural e da interação fibra-matriz durante o aquecimento (Ashteyat *et al.*, 2025). Desse modo, surge a necessidade de compilar o conhecimento já produzido sobre as propriedades residuais do UHPC, compreender como mitigar o deslocamento explosivo e apontar as lacunas ainda existentes na literatura sobre o tema.

## **1.1. OBJETIVOS**

Este trabalho tem como objetivo principal realizar uma revisão sistemática da literatura sobre o impacto da adição de diferentes tipos de fibras metálicas, sintéticas e naturais no comportamento do UHPC quando é submetido a elevadas temperaturas.

Além disso, também pode-se citar objetivos específicos como:

- Avaliar alterações microestruturais no UHPC de acordo com as fibras utilizadas e a temperatura de exposição;
- Analisar variações nas propriedades mecânicas do UHPC relacionadas ao aquecimento e à dosagem e aos tipos de fibras empregados;
- Verificar os tipos de fibras mais eficazes em mitigar o deslocamento explosivo do UHPC;
- Comparar a eficácia das fibras simples com as fibras híbridas;
- Analisar a viabilidade da adição de fibras naturais e recicladas ao UHPC, com o intuito de torná-lo mais sustentável.

## **1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

No Capítulo 2, o presente trabalho inicia-se com um referencial teórico dos principais elementos que serão abordados: UHPC, deslocamento explosivo e mecanismos de ação das fibras. No Capítulo 3, detalha-se a metodologia empregada para a seleção e filtragem dos artigos científicos utilizados neste estudo. No Capítulo 4, apresenta-se os resultados e

discussões acerca das características das publicações selecionadas (ano, revista e país de publicação e fibras empregadas), das propriedades do UHPC (resistências à compressão, à tração, à flexão e ao *spalling* e modo de elasticidade), de acordo com os tipos de fibras utilizados e a temperatura de exposição, das alterações microestruturais e porosidade, e, ao final deste capítulo, do desempenho das fibras naturais e recicladas adicionadas ao concreto. No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões do trabalho. Ao final do trabalho, apresenta-se as referências bibliográficas e o Apêndice A, com as informações dos artigos utilizados.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. UHPC: CONCEITO E PROPRIEDADES

O UHPC é um concreto de alta densidade conhecido por apresentar resistência mecânica, durabilidade e resiliência perante ambientes agressivos muito superiores aos concretos convencionais, sendo aplicado em diversos tipos de estruturas, como prédios e pontes (Ashteyat *et al.*, 2025). Este é composto, tipicamente, por cimento Portland comum, adições, agregados finos, fibras de aço, superplastificantes e água (Xie *et al.*, 2025). Além disso, pode-se incluir aditivos como cenosferas, metacaulim, entre outros, os quais permitem aumentar a resistência mecânica, elevar a estabilidade térmica e/ou reduzir a porosidade do concreto (Elfhenny *et al.*, 2025; Rui *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2025).

O UHPC, ao contrário dos concretos convencionais e de alta resistência, pode atingir resistência à compressão acima de 120 MPa e resistência à tração superior à 6 MPa, devido à sua matriz densamente compactada e à adição de fibras metálicas, como aço (Ashteyat *et al.*, 2025). Além disso, sua microestrutura densa garante baixa permeabilidade e porosidade, o que dificulta a entrada de agentes corrosivos e eventos como a carbonatação e o ataque de cloretos, aumentando a sua durabilidade (Ashteyat *et al.*, 2025). Por fim, o UHPC possui alta trabalhabilidade devido aos aditivos redutores de água de alta eficiência (HRWRs), mesmo com baixa relação água/cimento (a/c), em torno de 0,2 – 0,25 (Ashteyat *et al.*, 2025).

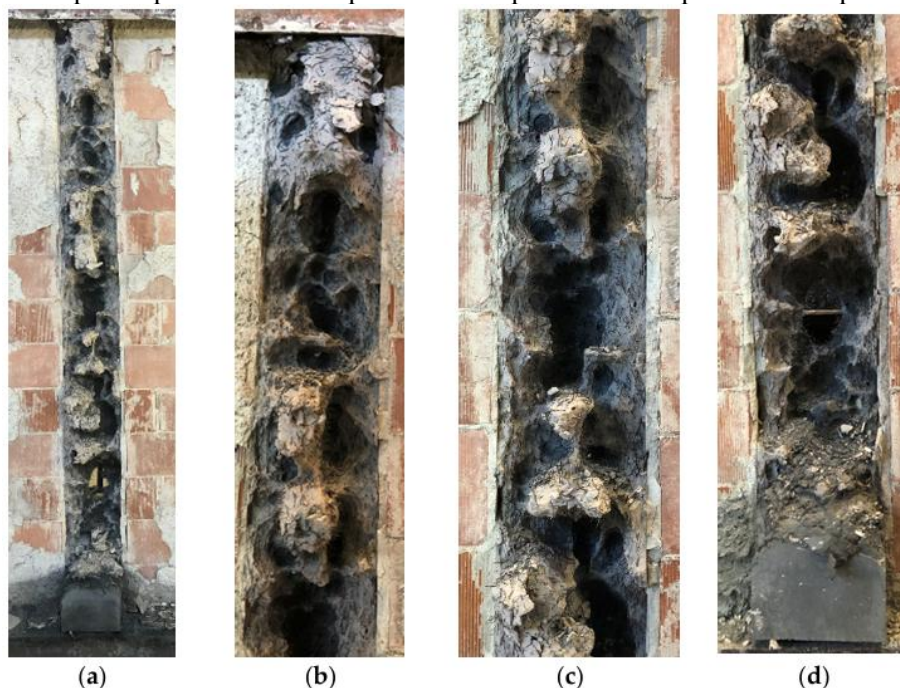
### 2.2. O FENÔMENO DO DESPLACAMENTO EXPLOSIVO (*SPALLING*)

O deslocamento explosivo (*spalling*) é um fenômeno caracterizado por uma ruptura frágil, súbita e violenta do concreto sob temperaturas elevadas. Tal fenômeno provoca grande liberação de energia, podendo levar à falha completa de estruturas de UHPC ou a uma redução significativa de sua capacidade de suporte de carga (Gao *et al.*, 2024).

O deslocamento explosivo do UHPC é ocasionado pelo efeito sinérgico de dois mecanismos: a tensão térmica, relacionada, sobretudo, à dilatação térmica diferencial de seus componentes, provocando degradação térmica (Khan *et al.*, 2024), e o rápido acúmulo de

pressão de vapor de água no interior dos poros, devido à rápida vaporização da água livre e da água quimicamente ligada no interior do material (Zao *et al.*, 2025), que forçam o material até sua ruptura, como observa-se no pilar da Figura 1:

Figura 1 - Exemplo de pilar de UHPC após sofrer deslocamento explosivo a temperatura elevada.



Fonte: Christ *et al.* (2023).

Desse modo, o UHPC é um material extremamente vulnerável ao deslocamento explosivo, dado que sua microestrutura densamente compactada e sua baixa permeabilidade não permitem a migração e a liberação do vapor de água do seu interior, aumentando a pressão interna, ao mesmo tempo que a tensão térmica provoca fissuração, reduzindo sua resistência, de forma a induzir este fenômeno (Khan *et al.*, 2024; Lin *et al.*, 2024a).

O deslocamento explosivo do UHPC em altas temperaturas é influenciado por diversos fatores, incluindo temperatura, tipo de fibra, teor de fibras, teor de umidade, efeito de dimensão, classe de resistência, taxa de aquecimento, entre outros (Lin *et al.*, 2024a). Dessa forma, há o desenvolvimento de diversos estudos a fim de aumentar a resistência do concreto ao deslocamento, sobretudo para situações de incêndio, que serão apresentados neste trabalho.

### 2.3. MECANISMOS DE AÇÃO DAS FIBRAS

As fibras mais empregadas no UHPC são as de aço, pois estas aumentam consideravelmente sua resistência à tração, promovem o encruamento por deformação, melhoram a ductilidade pós-fissuração e fortalecem os mecanismos de controle de fissuras (Hung *et al.*, 2024). Além disso, as fibras de aço aumentam a resistência à flexão e a tenacidade do concreto (Ashteyat *et al.*, 2025). No entanto, o uso exclusivo destas fibras não é efetivo para evitar o deslocamento explosivo e estas sofrem oxidação e corrosão a temperaturas acima de 800 °C, prejudicando suas propriedades mecânicas (Khan *et al.*, 2024; Ma *et al.*, 2024).

Outrossim, é extremamente comum a adição de fibras sintéticas ao UHPC, geralmente de forma híbrida com as de aço (ST), tais como: polipropileno (PP), polietileno tereftalato (PET), nylon (NY), acetato de polivinila (PVA) e poliacrilonitrila (PAN), as quais são apresentadas na Figura 2 (Lin *et al.*, 2024a). A utilização destas ocorre, sobretudo, devido ao seu baixo ponto de fusão, comparadas às fibras de aço, de modo que, sob elevadas temperaturas, estas derretem, de modo a formar microcanais para o vapor escapar, reduzindo a pressão interna e o risco de deslocamento explosivo (Ashteyat *et al.*, 2025; Ridha, 2024).

Figura 2 - Aparência das fibras de aço e sintéticas.



Fonte: Lin *et al.* (2024a).

Por fim, vale ressaltar que, no contexto do desenvolvimento sustentável, há um grande aumento de estudos acerca do uso de fibras naturais, como bambu, sisal, micro juta (MJ) e kenaf, no UHPC, em vez das sintéticas atualmente empregadas, pois apresentam baixa emissão de carbono, renovabilidade e biodegradabilidade. Tais pesquisas focam, especialmente, na capacidade das fibras orgânicas de evitar o deslocamento explosivo, dado que se degradam em temperaturas muito inferiores às fibras de aço, a fim de garantir que sua aplicação seja viável em projetos de engenharia (Le Lee, Tan, 2025; Ren, Gao, Zhang, 2022; Ridha, 2024; Xie *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2025).

### 3. METODOLOGIA

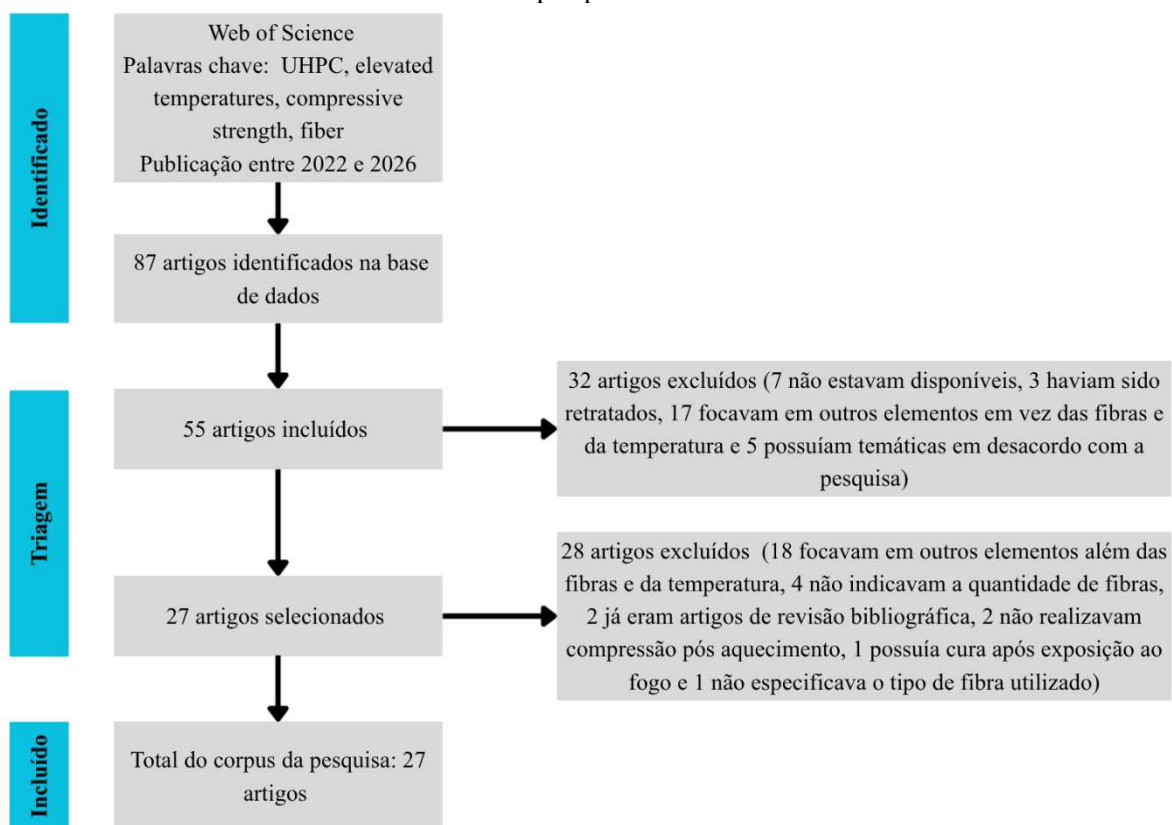
Primeiramente, foram pesquisados artigos referentes à resistência à compressão residual do UHPC após exposição a altas temperaturas na base de dados *Web of Science*, em março de 2026, utilizando as seguintes palavras-chave: UHPC AND elevated temperatures AND compressive strength AND fiber. A princípio foram identificados mais de 100 artigos, de maneira que se optou por incluir um filtro para mostrar apenas aqueles que foram publicados entre 2022 e 2026, de modo que restaram 87 publicações.

Em seguida, realizou-se uma análise preliminar dos artigos, mais focada em seus resumos e conclusões, a fim de excluir aqueles cujas pesquisas não estivessem alinhadas com o propósito deste trabalho. Dessa forma, 32 destes foram removidos, pois possuíam foco em outros elementos do traço de concreto, como aditivos, cimento e agregados, em vez das fibras, as publicações não estavam acessíveis ou haviam sido retratadas ou estudavam concreto não aquecido.

A seguir, realizou-se uma segunda filtragem dos artigos, com uma análise mais detalhada das propriedades do UHPC e das variáveis em seu traço estudadas, visando também identificar a presença das seguintes informações: porcentagem de fibra, tipo de fibra, resistência à compressão do concreto, método de ensaio, temperatura máxima e resistência à compressão pós-aquecimento. Desse modo, restaram apenas 27 publicações que foram utilizadas neste trabalho, sendo as demais excluídas pelos seguintes motivos: elas focavam em outros componentes do concreto além das fibras ou em variáveis externas adicionais à temperatura, não houve menção à quantidade ou ao tipo de fibra utilizado, a compressão foi realizada sem aquecimento ou a cura ocorreu após a exposição ao fogo.

A Figura 3 apresenta um fluxograma explicando a metodologia adotada para seleção dos artigos.

Figura 3 - Fluxograma indicando a metodologia aplicada na seleção dos artigos utilizados na pesquisa.



Fonte: O autor (2026).

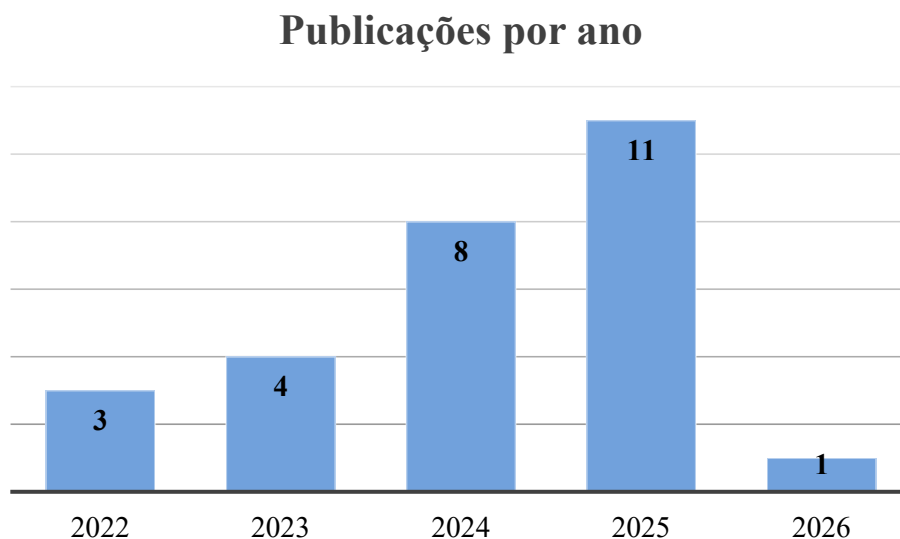
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Primeiramente, as informações acerca dos 27 artigos selecionados para esta pesquisa de revisão bibliográfica foram reunidas no Apêndice A, ao final do trabalho.

A seguir, percebe-se, com base na Figura 4, que houve um aumento das pesquisas sobre o UHPC sob altas temperaturas nos últimos anos, demonstrando o crescente interesse da comunidade científica global acerca deste tema, dado seu grande potencial de aplicação na Engenharia. Vale ressaltar que a pesquisa utilizou um filtro para exibir apenas aqueles que foram divulgados a partir de 2022 e foi realizada em março de 2026, de modo que só há um artigo publicado neste ano.

Figura 4 - Relação dos anos de publicação dos artigos selecionados.

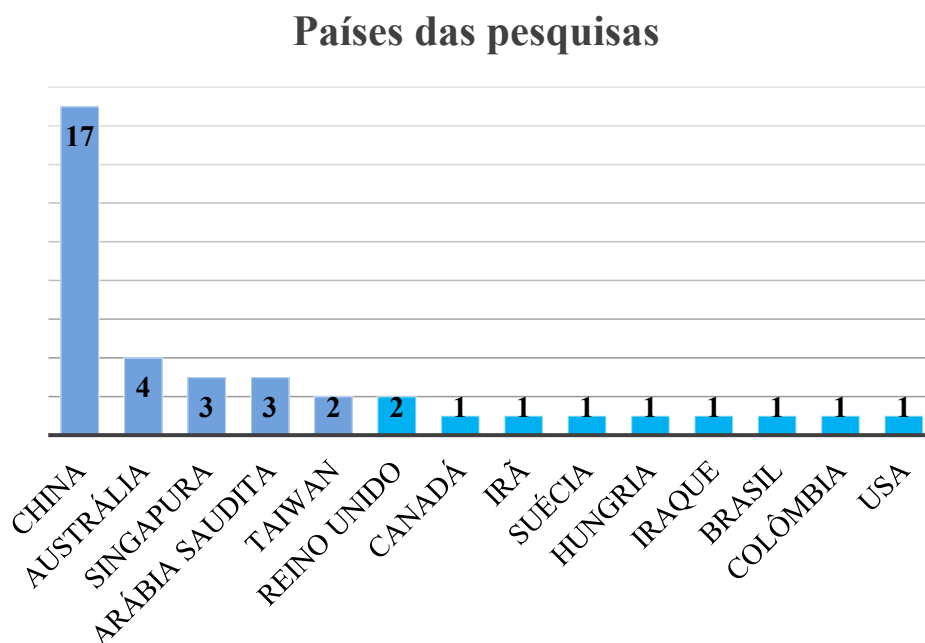


Fonte: O autor (2026).

A partir da Figura 5, evidencia-se que maioria dos artigos selecionados sobre o UHPC exposto a elevadas temperaturas foram publicados na China, apresentando mais que o quádruplo dos demais países e mostrando-se grande investimento nessa temática. Além

disso, vê-se mais publicações de países da Ásia e da Oceania, demonstrando maior investimento neste tipo de concreto do que na Europa e nas Américas.

Figura 5 - Quantidade de artigos por país entre os selecionados.

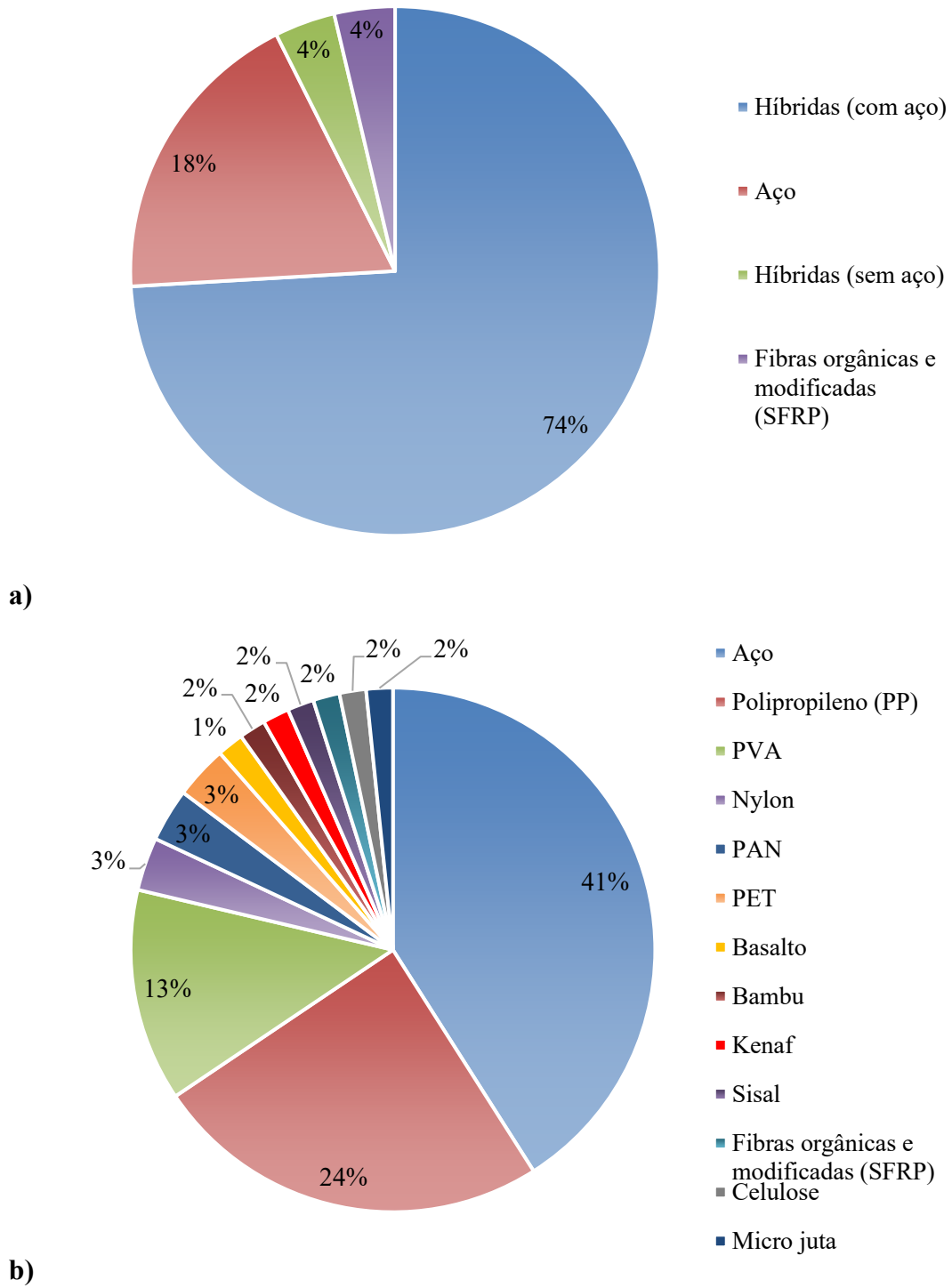


Fonte: O autor (2025).

Com base na Figura 6a, verifica-se a preferência pelas fibras híbridas, correspondendo a mais de 70 % dos artigos, sendo as fibras de aço as mais presentes nestas combinações, demonstrando que a hibridização é a tendência atual para evitar o deslocamento explosivo do UHPC. Além disso, também há muitos artigos empregando apenas fibras de aço, confirmando que é o tipo mais utilizado para a produção desse concreto.

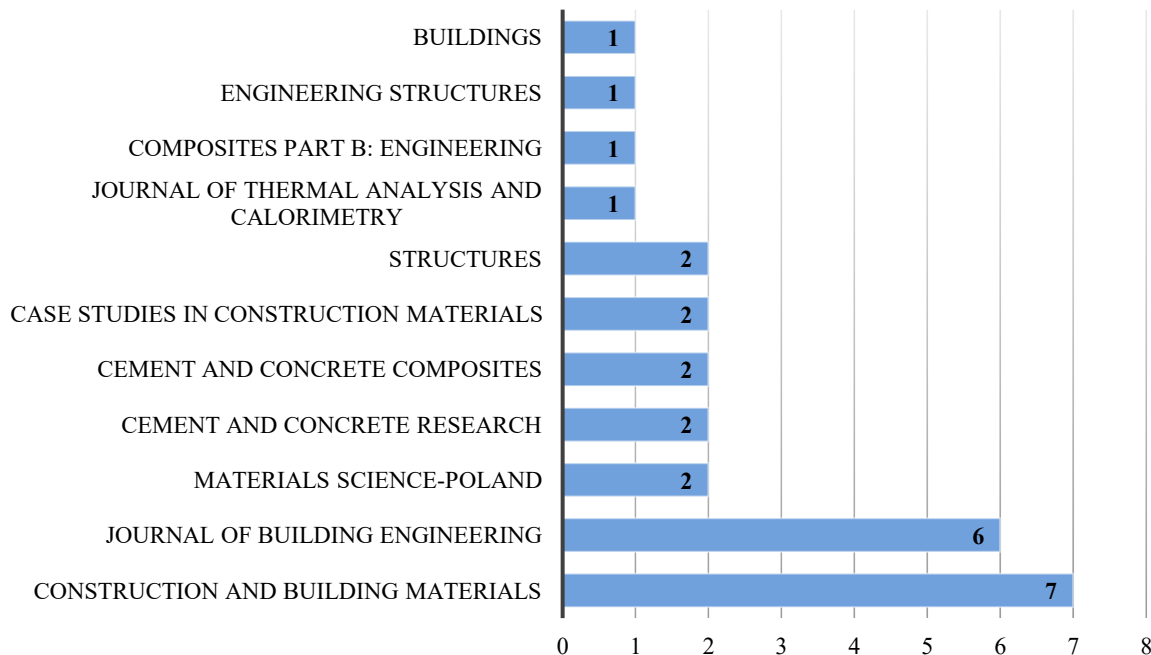
Ademais, percebe-se pela Figura 6b que as fibras sintéticas são as mais utilizadas nas combinações, após as de aço, destacando-se o PP e o PVA como os principais polímeros empregados a fim de mitigar o *spalling* do UHPC.

Figura 6 - Tipos de fibra utilizados nos artigos: a) combinações; b) individualmente.



Por fim, nota-se, com base na Figura 7, que as duas revistas mais frequentes foram o “*Journal of Building Engineering*” e a “*Construction and building materials*”, as quais são extremamente conceituadas perante a comunidade acadêmico-científica internacional.

Figura 7 - Relação das revistas científicas nas quais os artigos foram publicados.



Fonte: O autor (2026).

## 4.2. COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO

### 4.2.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

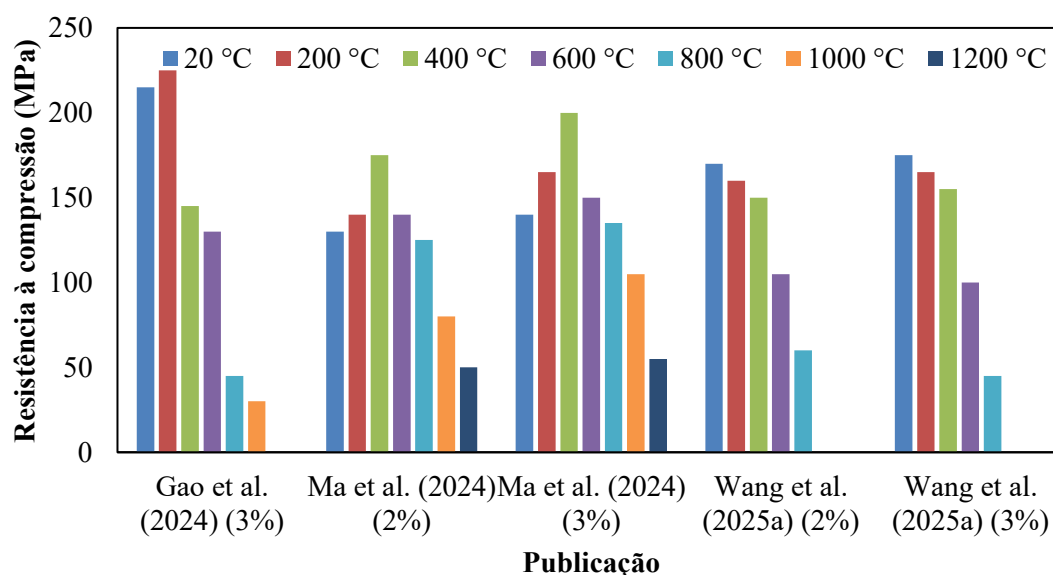
A resistência residual à compressão do UHPC sofre forte influência do tipo e da porcentagem de fibras e da temperatura de exposição. Gao *et al.* (2024), Ma *et al.* (2024) e Wang *et al.* (2025a) estudaram os efeitos das fibras de aço no UHPC, cujos resultados acerca da resistência residual à compressão em amostras cúbicas são apresentados na Figura 8.

Com base na Figura 8, percebe-se que ocorre um aumento da resistência à compressão no início do aquecimento devido à hidratação adicional das partículas de cimento a 200 °C,

seguido de uma redução crescente a partir dos 400 °C devido a dilatação diferencial dos componentes do concreto, formando fissuras, e a perda de resistência das fibras de aço. Além disso, nota-se que a redução entre 400 °C e 600 °C é pouco expressiva, pois as fibras servem como pontes para retardar a abertura de fissuras. Entretanto, nota-se que os estudos de Ma *et al.* (2024) obtiveram resistência aumentada até atingir 400 °C e mantiveram valores significativos até alcançarem 1200 °C, pois foi usado aço refratário, que é projetado para apresentar melhor desempenho térmico.

Além disso, percebe-se que as amostras com 3 % de aço comum apresentaram maior resistência à compressão do que os de 2 % até alcançar temperaturas extremas, visto que, a partir de 800 °C, além da degradação da resistência, há o aumento da oxidação e corrosão das fibras. Desse modo, percebe-se que, para o UHPC com aço comum, 800 °C pode ser considerada uma temperatura crítica, pois houve perda elevada na resistência, enquanto para o aço refratário pode-se considerar 1000 °C e 1200 °C.

Figura 8 - Resistências residuais à compressão do UHPC com fibras de aço a diferentes temperaturas.



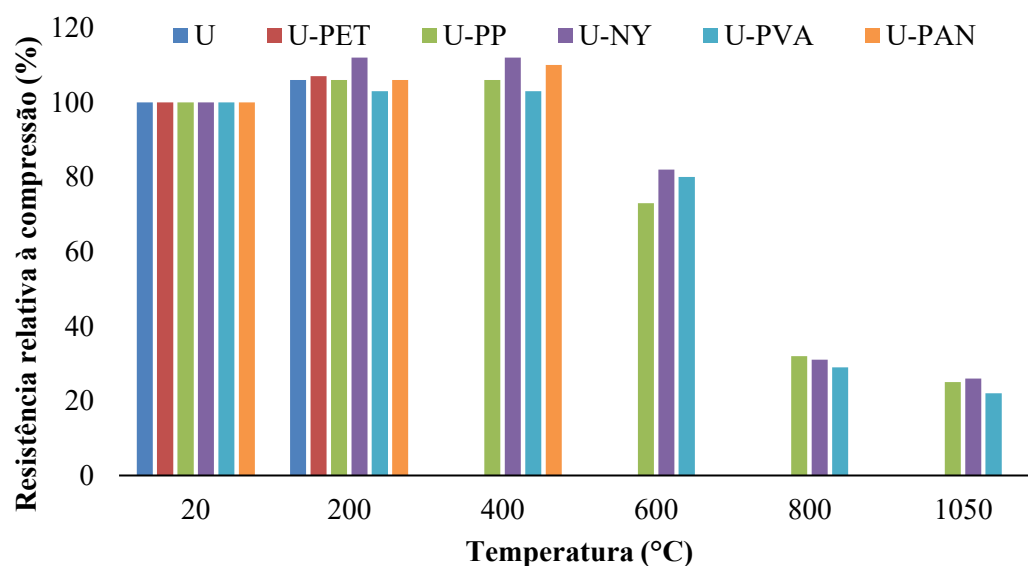
Fonte: O autor (2026).

Em relação ao UHPC com fibras híbridas, Lin *et al.* (2024a) e Lin *et al.* (2024b) compararam os efeitos de combinações de 2 % de fibras de aço com 0,3 % de sintéticas (PET,

PP, NY, PVA e PAN) na resistência residual à compressão do UHPC e obtiveram os resultados, para amostras cúbicas, mostrados na Figura 9.

Com base nos valores mostrados na Figura 9, vê-se que as fibras híbridas com melhor desempenho em relação à resistência residual à compressão do UHPC são aquelas com fibras de NY, PP e PVA, pois obtiveram valores similares e evitaram o deslocamento explosivo até a temperatura máxima, sendo as duas últimas as mais pesquisadas atualmente, como observou-se na Figura 6b, enquanto aquelas sem polímeros (U) e com PAN e PET sofreram *spalling* antes de 600 °C.

Figura 9 – Resultados de resistência residual à compressão relativa, obtidas do estudo de Lin *et al.* (2024a), do UHPC com várias combinações de fibras de aço e sintéticas



Fonte: O autor (2026).

Kong *et al.* (2025), Han *et al.* (2025), Arabani *et al.* (2025) e Huang *et al.* (2023) estudaram a resistência residual à compressão do UHPC aquecido a altas temperaturas com fibras híbridas de aço, PP e PVA, cujas porcentagens de fibras de algumas amostras cúbicas e resistência à compressão a elevadas temperaturas são mostradas na Tabela 1 e na Figura 10, respectivamente.

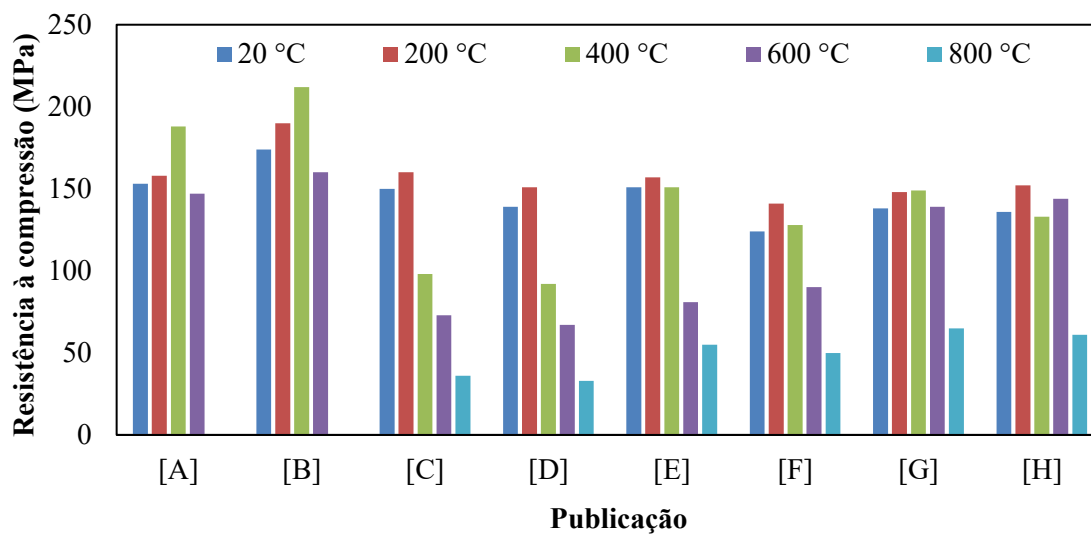
Com base na Figura 10, nota-se que as amostras apresentaram aumento de resistência à compressão a 200 °C ou 400 °C, seguido de queda conforme a elevação da temperatura, assim como os exemplos da Figura 9, confirmando essa tendência. Ademais, evidencia-se que os cubos com maior porcentagem de aço possuem maior resistência, porém apenas aqueles com maior quantidade de PP e PVA não sofrem *spalling* até os 800 °C.

Tabela 1 - Porcentagens de fibras das amostras cúbicas das pesquisas.

| Resistência à compressão em amostras cúbicas |               |         |        |         |
|----------------------------------------------|---------------|---------|--------|---------|
| Publicação                                   | Identificação | Fibras  |        |         |
|                                              |               | aço (%) | PP (%) | PVA (%) |
| Kong <i>et al.</i> (2025)                    | [A]           | 2       | 0,3    |         |
| Kong <i>et al.</i> (2025)                    | [B]           | 3       | 0,3    |         |
| Han <i>et al.</i> (2025)                     | [C]           | 1       | 1      |         |
| Han <i>et al.</i> (2025)                     | [D]           | 0,5     | 1,5    |         |
| Arabani <i>et al.</i> (2025)                 | [E]           | 1       | 0,2    |         |
| Arabani <i>et al.</i> (2025)                 | [F]           | 1       |        | 0,6     |
| Arabani <i>et al.</i> (2025)                 | [G]           | 1       | 0,4    | 0,2     |
| Huang <i>et al.</i> (2023)                   | [H]           | 0,5     | 0,15   |         |

Fonte: O autor (2026).

Figura 10 - Resistências residuais à compressão dos corpos de prova cúbicos.



Fonte: O autor (2026).

#### 4.2.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

O teor de fibras e a temperatura de exposição do UHPC também exercem muita influência na resistência residual à tração, como verificado nos estudos realizados por Hung; Yulianti; Agrawal (2024), Abadel; Khan; Masmoudi (2023) e Agrawal *et al.* (2025), cujas concentrações de fibras das amostras e os resultados dos ensaios de tração uniaxial são mostrados na Tabela 2, na Figura 11 e na Figura 12, respectivamente.

Por meio da Figura 11, nota-se que todos os corpos de prova experimentaram aumento de resistência à tração até os 200 °C, que é explicado pela hidratação adicional do cimento do UHPC, seguido de redução conforme a elevação da temperatura, devido à perda de resistência das fibras e à formação de microfissuras, assim como ocorreu nos testes de compressão. Além disso, percebe-se que as amostras que possuem apenas fibras de aço não chegam aos 500 °C, pois após 300 °C há o deslocamento explosivo, ao contrário daquelas com PP, que continuam com perda de resistência à tração até 700 °C, evidenciando-se melhor desempenho naquela com maior quantidade de fibras sintéticas. Por fim, percebe-se na Figura 12 que os corpos de prova com maior concentração de fibras de PP e PVA também apresentaram melhores resultados, comprovando que estas melhoram esta propriedade mecânica.

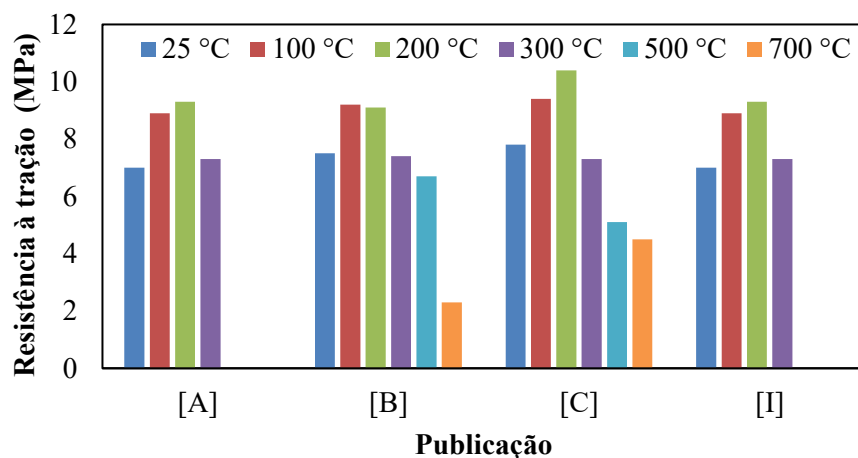
Tabela 2 - Teores de fibras das amostras utilizadas nos ensaios de tração.

| Resistência à tração           |               |         |        |         |
|--------------------------------|---------------|---------|--------|---------|
| Publicação                     | Identificação | Fibras  |        |         |
|                                |               | aço (%) | PP (%) | PVA (%) |
| Hung; Yulianti; Agrawal (2024) | [A]           | 1,5     |        |         |
| Hung; Yulianti; Agrawal (2024) | [B]           | 1,5     | 0,5    |         |
| Hung; Yulianti; Agrawal (2024) | [C]           | 1,5     | 1      |         |
| Abadel; Khan; Masmoudi (2023)  | [D]           | 1       |        |         |
| Abadel; Khan; Masmoudi (2023)  | [E]           | 0,7     |        | 0,3     |

|                                  |     |     |     |     |
|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Abadel; Khan;<br>Masmoudi (2023) | [F] | 0,7 | 0,1 | 0,2 |
| Abadel; Khan;<br>Masmoudi (2023) | [G] | 0,7 |     | 0,2 |
| Abadel; Khan;<br>Masmoudi (2023) | [H] | 0,5 |     | 0,5 |
| Agrawal <i>et al.</i> (2025)     | [I] | 1,5 |     |     |

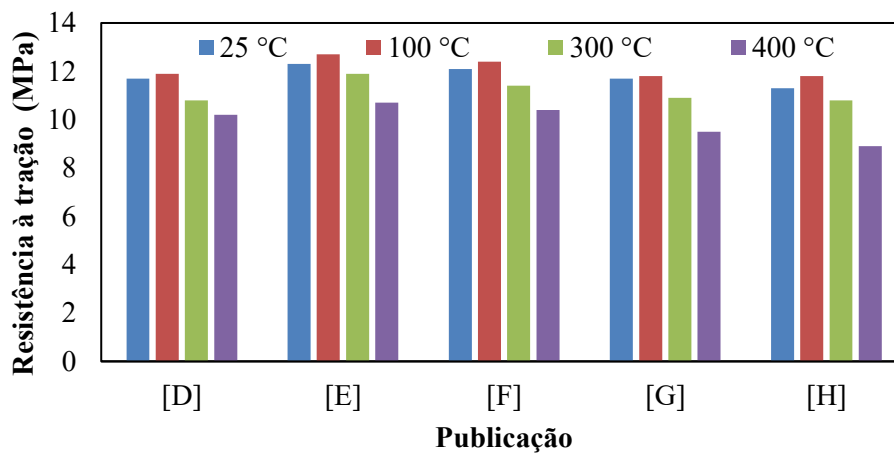
Fonte: O autor (2026).

Figura 11 - Resistências residuais à tração nas pesquisas de Hung; Yulianti; Agrawal (2024) e Agrawal *et al.* (2025).



Fonte: O autor (2026).

Figura 12 - Resistências residuais à tração no estudo de Abadel; Khan; Masmoudi (2023).



Fonte: O autor (2026).

#### 4.2.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

O teor de fibras e a temperatura do UHPC também são extremamente relevantes na sua resistência residual à flexão, como estudado por Lin *et al.* (2024b), Kong *et al.* (2025) e Arabani; Naserabadi; Aminyavari (2025). As concentrações de fibras de alguns corpos de prova prismáticos utilizados nestas pesquisas, assim como suas respectivas resistências residuais à flexão, de acordo com a temperatura de exposição, são apresentadas na Tabela 3 e na Figura 13, respectivamente.

Com base na Figura 13, percebe-se que os maiores valores de resistência residual à flexão correspondem às amostras de UHPC com maior quantidade de fibras de aço, que possuem excelente performance perante este esforço. No entanto, percebe-se que os corpos de prova sem fibras sintéticas só alcançaram temperaturas até 600 °C, pois são mais vulneráveis ao deslocamento explosivo.

Ademais, nota-se, assim como para a compressão e a tração, um aumento inicial da resistência à flexão para a maior parte das amostras a 200 °C, devido à hidratação adicional do cimento, seguido de reduções significativas conforme a temperatura continua a aumentar. No entanto, evidencia-se que as amostras com adição de fibras de PP, PVA e NY mantiveram resistência significativa mesmo para temperaturas de 600 °C e 800 °C, ao contrário daquelas apenas com aço, pois há menor pressão interna e formação de microfissuras. Entretanto, evidencia-se que os corpos de prova com maior concentração de fibras sintéticas possuem menor resistência sob flexão, já que são menos resistentes do que as fibras de aço, de modo que altas porcentagens daquelas são prejudiciais a esta propriedade mecânica do UHPC.

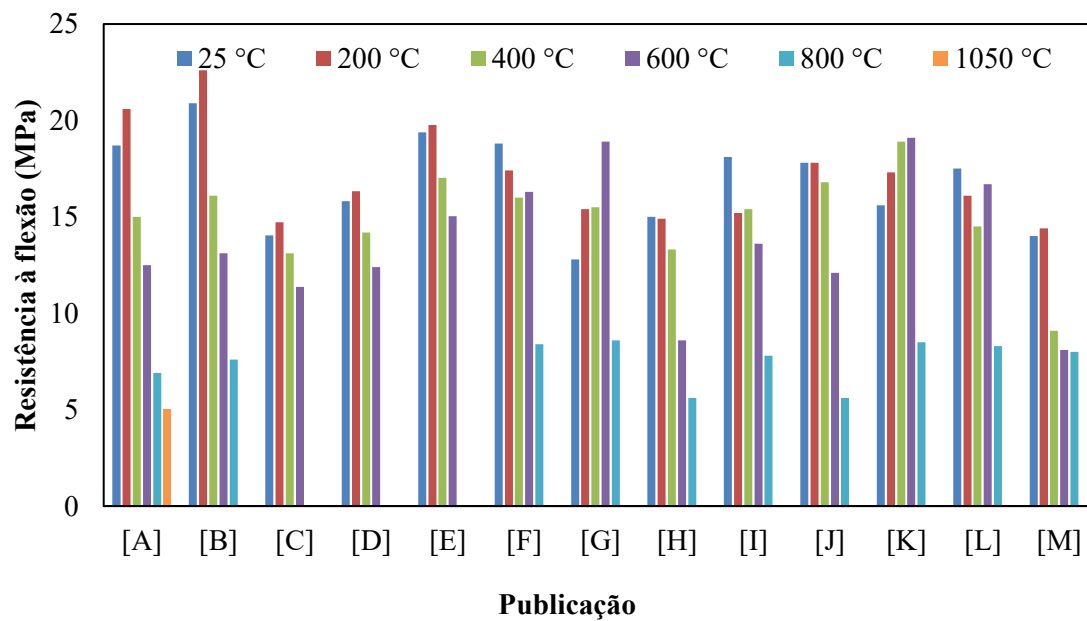
Tabela 3 - Porcentagens de fibras das amostras prismáticas utilizadas nos ensaios de flexão.

| Resistência à flexão      |               |         |        |         |        |
|---------------------------|---------------|---------|--------|---------|--------|
| Publicação                | Identificação | Fibras  |        |         |        |
|                           |               | aço (%) | PP (%) | PVA (%) | NY (%) |
| Lin <i>et al.</i> (2024b) | [A]           | 2       | 0,3    |         |        |
| Lin <i>et al.</i> (2024b) | [B]           | 2       |        |         | 0,3    |
| Kong <i>et al.</i> (2025) | [C]           | 1       |        |         |        |
| Kong <i>et al.</i> (2025) | [D]           | 2       |        |         |        |
| Kong <i>et al.</i> (2025) | [E]           | 3       |        |         |        |

|                                        |     |     |     |     |  |
|----------------------------------------|-----|-----|-----|-----|--|
| Arabani; Naserabadi; Aminyavari (2025) | [F] | 1,5 |     |     |  |
| Arabani; Naserabadi; Aminyavari (2025) | [G] | 1   | 0,4 |     |  |
| Arabani; Naserabadi; Aminyavari (2025) | [H] | 1   | 0,6 |     |  |
| Arabani; Naserabadi; Aminyavari (2025) | [I] | 1   |     | 0,2 |  |
| Arabani; Naserabadi; Aminyavari (2025) | [J] | 1   |     | 0,4 |  |
| Arabani; Naserabadi; Aminyavari (2025) | [K] | 1   | 0,2 | 0,2 |  |
| Arabani; Naserabadi; Aminyavari (2025) | [L] | 1   | 0,2 | 0,4 |  |
| Arabani; Naserabadi; Aminyavari (2025) | [M] | 1   | 0,4 | 0,2 |  |

Fonte: O autor (2026).

Figura 13 - Resistências residuais à flexão obtidas nos estudos selecionados.



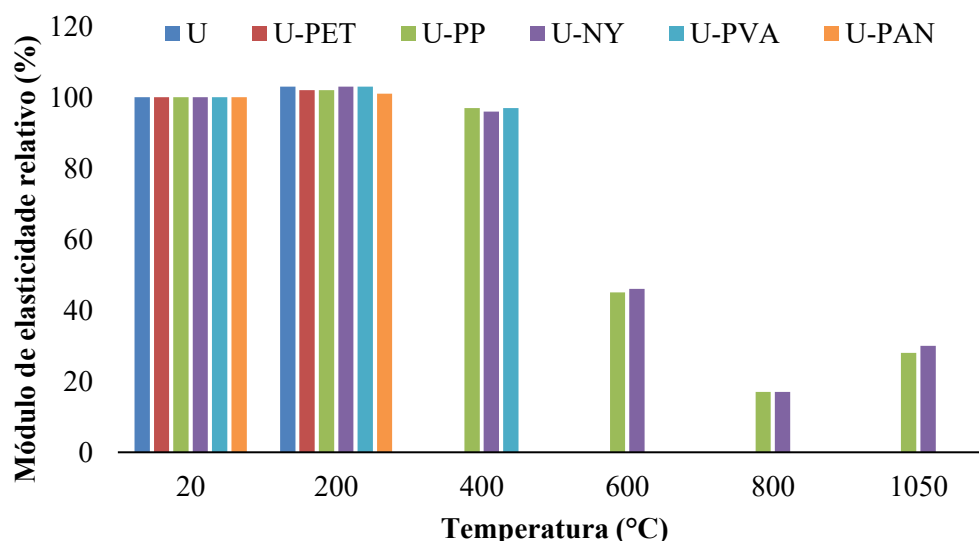
Fonte: O autor (2026).

#### 4.2.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE

Outra propriedade mecânica do UHPC fortemente influenciada pelas fibras e pela temperatura é o seu módulo de elasticidade. Lin *et al.* (2024a) estudou essa propriedade em amostras prismáticas com 2% de fibras de aço e 0,3% de diferentes fibras sintéticas por meio de testes de compressão uniaxial, obtendo-se os resultados mostrados na Figura 14.

Após analisar-se a Figura 14, percebe-se que as amostras de UHPC com melhor desempenho foram aquelas com PP e NY, pois são as únicas que resistiram a temperaturas de mais de 400 °C, mantendo módulos de elasticidade consideráveis. Além disso, nota-se que, a princípio, há um aumento a 200 °C, assim como para as demais propriedades mecânicas, devido à hidratação adicional do concreto, seguido de uma redução, a qual é mais expressiva entre 400 °C e 600 °C. No entanto, nota-se que entre 800 °C e 1050 °C há uma tendência de crescimento, o que se explica pela reação de sinterização do concreto acima de 1000 °C, que densificou a sua estrutura interna, resultando em um certo aumento no módulo de elasticidade residual.

Figura 14 - Módulos de elasticidade residuais relativos das amostras prismáticas de UHPC com diferentes fibras sintéticas do estudo de Lin *et al.* (2024a).



Fonte: O autor (2026).

Ademais, estudos acerca do módulo de elasticidade residual do UHPC foram conduzidos por Ma *et al.* (2024) e Kong *et al.* (2025) utilizando amostras prismáticas sob compressão uniaxial, cujas concentrações de fibras e resultados dos testes encontram-se na Tabela 4 e na Figura 15, respectivamente.

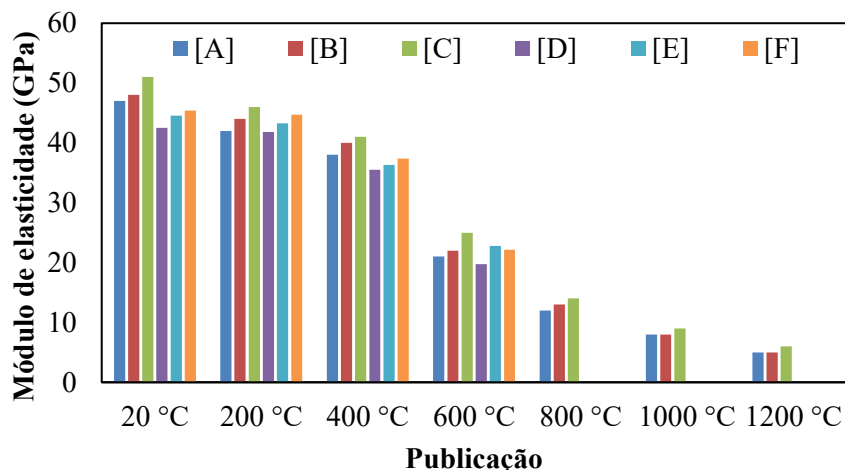
Comparando-se os resultados das amostras da Figura 15, nota-se que aquelas desenvolvidas por Ma *et al.* (2024) obtiveram maiores módulos de elasticidade residuais e alcançaram temperaturas mais elevadas, pois utilizaram aço refratário, o qual possui performance térmica muito superior ao aço comum, provando-se eficaz como adição no UHPC, enquanto as feitas por Kong *et al.* (2025) obtiveram resultados inferiores e só alcançaram os 600 °C, pois foi a temperatura limite dos testes realizados. Entretanto, em ambos os estudos se nota que o módulo de elasticidade residual das amostras de UHPC cresce conforme o aumento da quantidade de fibras de aço, pois estas possuem altos valores para esta propriedade, além de uma queda crescente conforme a elevação da temperatura, sobretudo entre 400 °C e 600 °C, pois há a degradação das propriedades das fibras de aço e a formação de microfissuras, prejudicando sua performance.

Tabela 4 - Porcentagens de fibras das amostras prismáticas utilizados nos ensaios para determinar o módulo de elasticidade residual.

| Módulo de elasticidade    |               |         |        |
|---------------------------|---------------|---------|--------|
| Publicação                | Identificação | Fibras  |        |
|                           |               | aço (%) | PP (%) |
| Ma <i>et al.</i> (2024)   | [A]           | 1       |        |
| Ma <i>et al.</i> (2024)   | [B]           | 2       |        |
| Ma <i>et al.</i> (2024)   | [C]           | 3       |        |
| Kong <i>et al.</i> (2025) | [D]           | 1       | 0,3    |
| Kong <i>et al.</i> (2025) | [E]           | 2       | 0,3    |
| Kong <i>et al.</i> (2025) | [F]           | 3       | 0,3    |

Fonte: O autor (2026).

Figura 15 - Módulos de elasticidade residuais das amostras prismáticas de UHPC.



Fonte: O autor (2026).

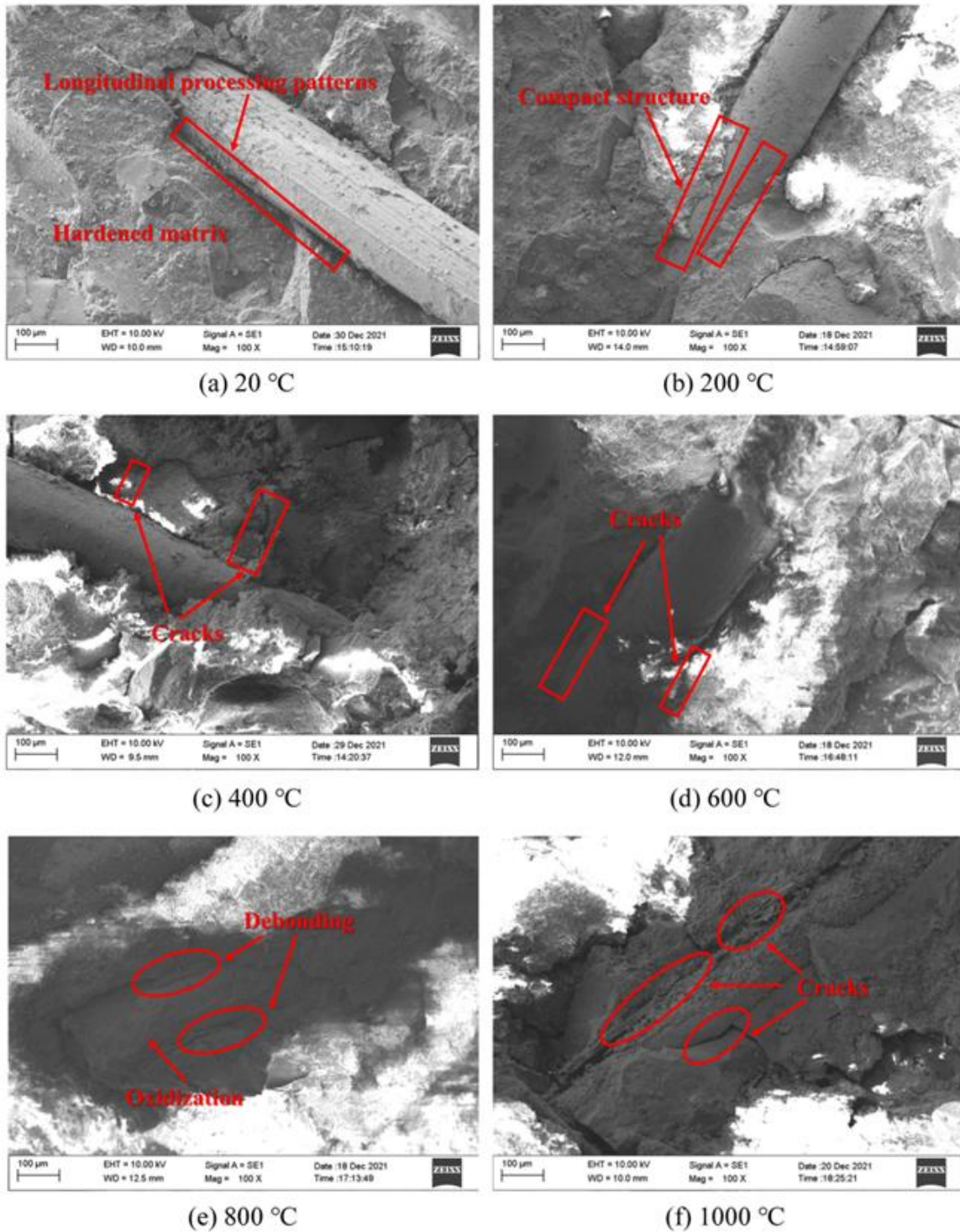
#### 4.3. ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS E POROSIDADE

O aumento da temperatura certamente provoca alterações na microestrutura interna do UHPC, porém a maneira como estas ocorrem depende diretamente dos tipos de fibras presentes na sua composição. As fibras de aço são as mais empregadas neste tipo de concreto e sua presença impacta a morfologia microscópica do compósito, como verificado no estudo de Gao *et al.* (2024), cujas imagens dos testes de Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM) são mostradas na Figura 16.

Pela análise da Figura 16, nota-se que a 200 °C há uma densificação da zona de transição interfacial (ZTI) entre a fibra de aço e a matriz em relação a temperatura ambiente, devido à hidratação adicional do cimento, que também promove o aumento da resistência mecânica. Em seguida, a 400 °C, verifica-se a formação de microfissuras de retração na interface relacionadas à desidratação dos componentes da matriz circundante, a qual prossegue a 600 °C, enfraquecendo a capacidade de transferência de carga da fibra de aço. Quando a temperatura de exposição ultrapassa 800 °C, percebe-se que a superfície da fibra de aço torna-se rugosa devido à oxidação, e as suas propriedades são severamente degradadas. Além disso, observa-se o aumento gradual das fissuras provocadas pela incompatibilidade entre a expansão da fibra de aço e a deformação por retração da matriz,

fazendo com que a fibra perca sua capacidade de transmitir tensões. Ao final, quando a temperatura atinge 1000 °C, nota-se que a fibra de aço foi completamente oxidada e perdeu sua forma original e que o espaço anteriormente ocupado por ela na ZTI transforma-se em um macrodefeito, agravando os danos na matriz e levando à perda da capacidade do corpo de prova de resistir a carregamentos externos.

Figura 16 - Morfologia da zona de aderência entre a matriz cimentícia do UHPC e as fibras de aço a elevadas temperaturas.

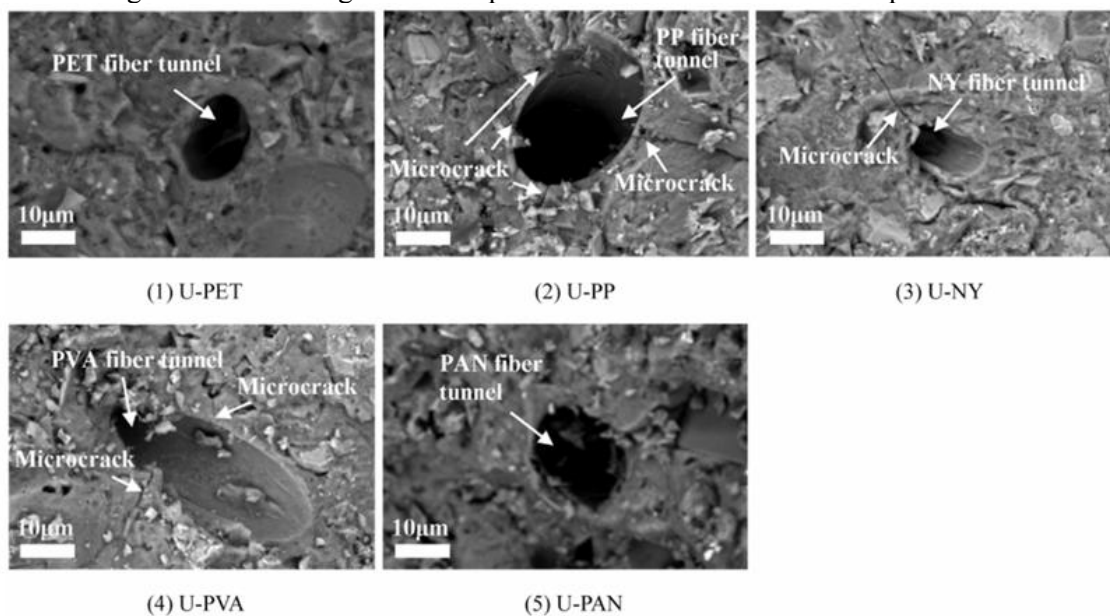


Fonte: Gao *et al.* (2024).

Outrossim, Lin *et al.* (2024b) estudaram os efeitos das fibras sintéticas no UHPC, já que são uma adição extremamente comum, bem como a morfologia microscópica do concreto com vários tipos destas, além das fibras de aço, utilizando testes SEM, assim como mostrado na Figura 17.

Na Figura 17, é possível notar os canais formados após a fusão das fibras sintéticas, que ocorre em torno dos 200 °C. No entanto, a expansão térmica ocorre antes de atingir essa temperatura, já que os coeficientes de expansão térmica das fibras sintéticas e da matriz cimentícia apresentam diferenças significativas. Essa incompatibilidade térmica em altas temperaturas é crucial para a formação de uma rede de microfissuras dentro da matriz de UHPC, que permite a redução da pressão interna, reduzindo o risco do deslocamento explosivo. Além disso, evidencia-se que nas matrizes das amostras com PP, PVA e NY, formaram-se microfissuras ao longo da interface fibra-matriz devido à incompatibilidade térmica em temperaturas elevadas, enquanto microfissuras semelhantes não foram observadas nas matrizes com PET e PAN, pois estas possuem maiores pontos de fusão e menores coeficientes de dilatação térmica, tornando-as mais suscetíveis ao deslocamento.

Figura 17 - Morfologia microscópica do UHPC com várias fibras após 200 °C.

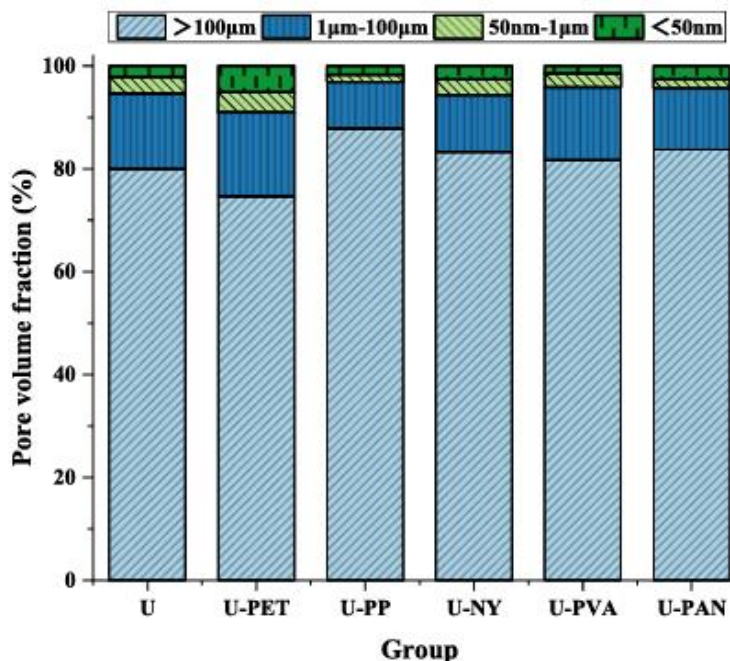


Fonte: Lin *et al.* (2024b).

Ademais, foram utilizados testes de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (MIP) para determinar o tamanho dos poros nas matrizes de UHPC após a exposição a altas temperaturas, assim como sua distribuição, como pode-se observar na Figura 18.

Na Figura 18, percebe-se que, em todas as amostras, a proporção de macroporos (aqueles com mais de 100  $\mu\text{m}$ ) foi bem alta, com alguns superando 80 %, indicando um significativo aumento dos poros no concreto após a exposição a altas temperaturas. Ademais, evidencia-se que a maior porcentagem de macroporos ocorreu no corpo de prova com fibras de PP, pois possuem o menor ponto de fusão, justificando sua preferência como adição para impedir o deslocamento explosivo do UHPC.

Figura 18 - Distribuição e tamanho dos poros das amostras de UHPC com combinação de fibras de aço e sintéticas e sem as últimas (U).



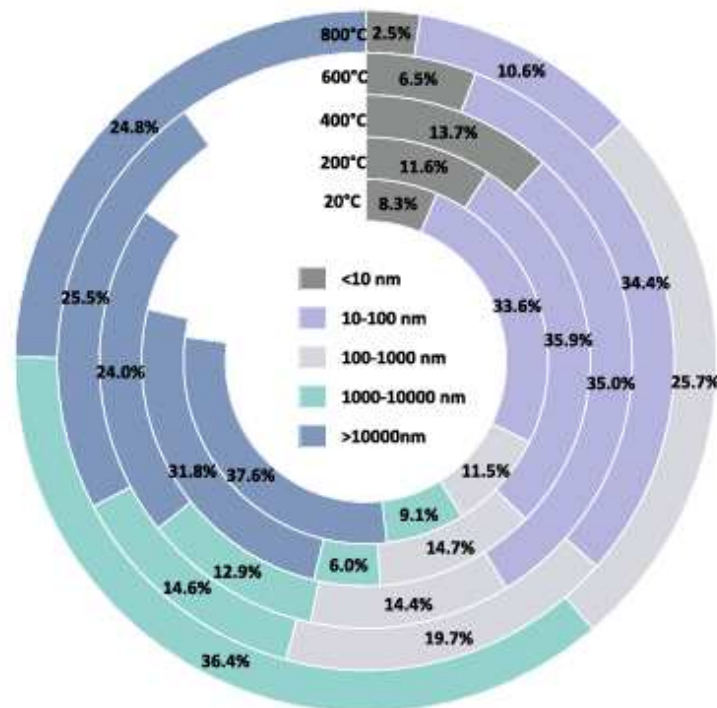
Fonte: Lin *et al.* (2024b).

Além disso, pode-se citar o estudo desenvolvido por Chen *et al.* (2024), que estudou a evolução dos poros em amostras de UHPC com aço reciclado e polipropileno conforme o aumento da temperatura, como é apresentado no gráfico da Figura 19.

Com base na Figura 19, vê-se que não ocorre um aumento significativo da porosidade do UHPC entre a temperatura ambiente e 200 °C, pois apesar das microfissuras formadas nas

interfaces fibra-matriz devido à diferença dos coeficientes de dilatação térmica, tanto para as fibras de aço quanto para as sintéticas, há também a densificação da microestrutura promovida pela hidratação secundária do cimento. Em seguida, percebe-se uma elevação mais significativa da porosidade do UHPC ao atingir 400 °C, devido, principalmente, à evaporação da água livre e absorvida antes de 200 °C, somada à fusão das fibras de PP. Por fim, nota-se que a 600 °C e a 800 °C, a porosidade acumulada das amostras de UHPC aumenta de maneira expressiva, destacando-se a maior contribuição dos macroporos, o que pode ser atribuído à extensa decomposição dos produtos de hidratação e à perda gradual da densificação estrutural, além da conexão entre as microfissuras induzidas termicamente e dos vazios deixados pela fusão das fibras de PP, formando uma rede de fissuras e vazios, a qual aumenta significativamente a permeabilidade do concreto e eleva sua porosidade.

Figura 19 - Distribuição volumétrica dos poros no UHPC a elevadas temperaturas.



Fonte: Chen *et al.* (2024).

#### 4.4. PREVENÇÃO DO *SPALLING* E A SINERGIA DAS FIBRAS HÍBRIDAS

O *spalling* é certamente uma das maiores preocupações em relação ao UHPC reforçado com fibras sob elevadas temperaturas, de modo que muitos estudos têm dado destaque à sua prevenção, como as pesquisas de Lin *et al.* (2024a) e Lin *et al.* (2024b), que estudaram o efeito da adição de 0,3 % de diferentes fibras sintéticas ao UHPC com 2 % de fibras de aço, comparando com uma amostra que possuía apenas as últimas, utilizando-se corpos de provas cúbicos (C) e prismáticos com 300 mm (P3) e 400 mm (P4) de comprimento, obtendo-se os resultados mostrados na Tabela 5, na Figura 20 e na Figura 21.

A Tabela 5 e a Figura 20 mostram que todas as amostras de UHPC apenas com fibras de aço (U) sofreram deslocamento explosivo a 400 °C, provando a ineficiência individual destas fibras em preveni-lo. Além disso, nota-se que as fibras de PET tiveram os mesmos resultados, enquanto as de PAN apresentaram 600 °C como temperatura crítica, de modo que ambas também são ineficazes para reduzir o risco de *spalling*. Ademais, nota-se que, para as amostras cúbicas, as demais fibras sintéticas (PP, PVA e NY) impediram essa falha até o limite do estudo (1050 °C), de maneira que são mais eficientes.

Entretanto, analisando-se a Tabela 5 e a Figura 21, nota-se que as fibras de PVA não impediram o deslocamento explosivo dos corpos de prova de UHPC prismáticos para temperaturas de 400 °C (P4) e 600 °C (P3), demonstrando que estas não são eficazes para evitar essa falha. Além disso, observou-se que o aumento do comprimento elevou a sensibilidade ao *spalling*, pois o aumento do volume gerou um gradiente de temperatura mais pronunciado entre o interior e a superfície quando submetidos a temperaturas elevadas, provocando expansão térmica desigual e gerando aumento significativo das tensões e fissurações internas.

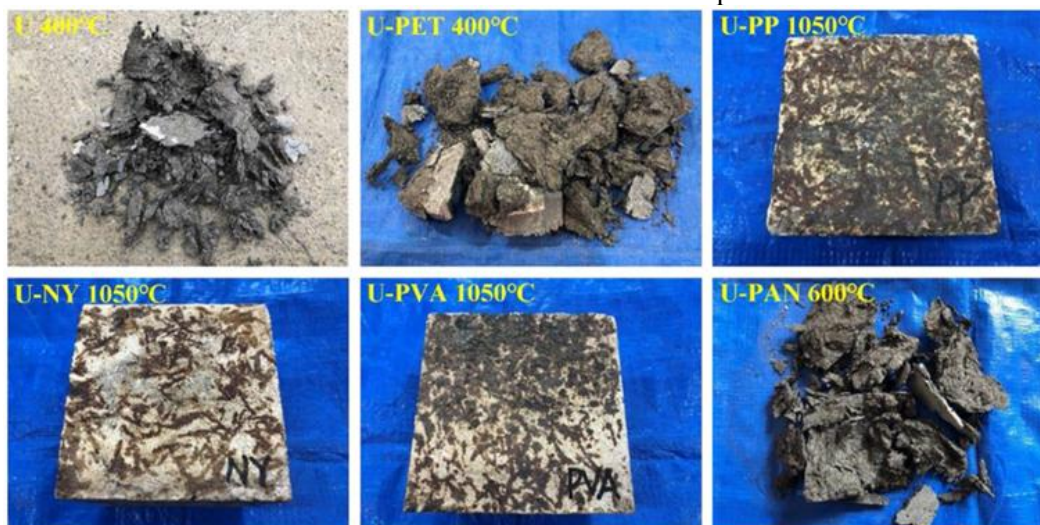
Outrossim, a Tabela 5 e a Figura 21 mostram que as fibras de PP e NY apresentaram o melhor desempenho na prevenção do deslocamento explosivo do UHPC, pois todos os corpos de prova prismáticos resistiram até 800 °C. No entanto, percebe-se que as amostras de 400 mm de comprimento com NY não resistiram a 1050 °C, ao contrário daqueles com PP, indicando que estas são as fibras sintéticas mais eficazes para evitar o *spalling* a elevadas temperaturas, já que possuem menor ponto de fusão e maior coeficiente de dilatação térmica.

Tabela 5 – Resultados dos testes de Lin *et al.* (2024b) para o *spalling* do UHPC com diferentes fibras sintéticas a elevadas temperaturas.

| <b>Spalling fibras sintéticas</b> |                |              |               |               |               |               |                |
|-----------------------------------|----------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| <b>Grupo</b>                      | <b>Formato</b> | <b>25 °C</b> | <b>200 °C</b> | <b>400 °C</b> | <b>600 °C</b> | <b>800 °C</b> | <b>1050 °C</b> |
| U/U-PET                           | C              | ✓            | ✓             | x             | x             | x             | x              |
|                                   | P3             | ✓            | ✓             | x             | x             | x             | x              |
|                                   | P4             | ✓            | ✓             | x             | x             | x             | x              |
| U-PP                              | C              | ✓            | ✓             | ✓             | ✓             | ✓             | ✓              |
|                                   | P3             | ✓            | ✓             | ✓             | ✓             | ✓             | ✓              |
|                                   | P4             | ✓            | ✓             | ✓             | ✓             | ✓             | ✓              |
| U-NY                              | C              | ✓            | ✓             | ✓             | ✓             | ✓             | ✓              |
|                                   | P3             | ✓            | ✓             | ✓             | ✓             | ✓             | ✓              |
|                                   | P4             | ✓            | ✓             | ✓             | ✓             | ✓             | x              |
| U-PVA                             | C              | ✓            | ✓             | ✓             | ✓             | ✓             | ✓              |
|                                   | P3             | ✓            | ✓             | ✓             | x             | x             | x              |
|                                   | P4             | ✓            | ✓             | x             | x             | x             | x              |
| U-PAN                             | C              | ✓            | ✓             | ✓             | x             | x             | x              |
|                                   | P3             | ✓            | ✓             | x             | x             | x             | x              |
|                                   | P4             | ✓            | ✓             | x             | x             | x             | x              |

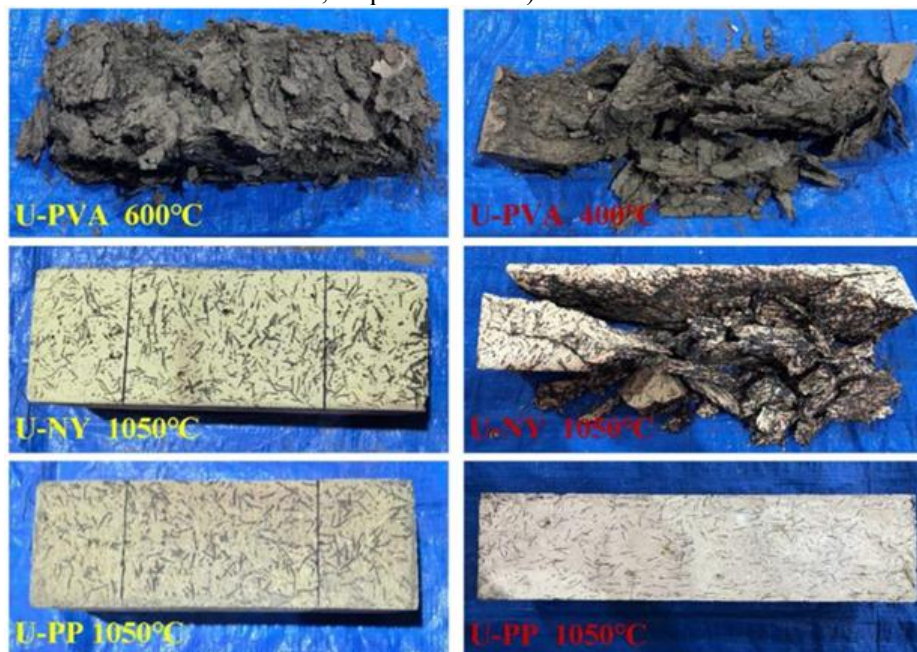
Fonte: O autor (2026).

Figura 20 - Comportamento do deslocamento explosivo das amostras cúbicas de UHPC com diferentes fibras sintéticas a elevadas temperaturas.



Fonte: Lin *et al.* (2024b).

Figura 21 - Comportamento do deslocamento explosivo das amostras prismáticas (com comprimento de 300 mm e 400 mm, respectivamente) de UHPC com diferentes fibras sintéticas.



Fonte: Lin *et al.* (2024b).

Ademais, Huang *et al.* (2025) também realizou um estudo sobre o impacto da adição de fibras sintéticas (PP e PVA) ao UHPC, obtendo os resultados em relação ao deslocamento explosivo apresentados na Tabela 6.

A Tabela 6 mostra que as amostras que continham apenas fibras de aço sofreram deslocamento explosivo severo antes de atingirem os 600 °C, enquanto aquelas com aço e PVA também falharam ao atingir esta temperatura e aquelas com aço e PP resistiram mesmo até 1000 °C. Desse modo, confirma-se que a mistura híbrida de aço e PP é o sistema mais eficaz para o UHPC, pois o metal preserva a integridade mecânica enquanto o polímero reduz a pressão interna e previne o *spalling*.

Tabela 6 - Aparência das amostras de UHPC após exposição a altas temperaturas. Obs.: SF6 e SF15 referem-se às fibras de aço de 6 mm e 15 mm de comprimento, respectivamente.

| UHPC type                                | 25°C                                                                                | 200°C                                                                               | 400°C                                                                               | 600°C                                                                               | 800°C                                                                                | 1000°C                                                                               |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| UHPC1<br>2.5% SF15                       |    |    |    |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                      |
| UHPC2<br>1.5% SF15<br>1% SF6             |    |    |    |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                      |
| UHPC3<br>1.5% SF15<br>1% SF6<br>0.5% PP  |    |    |    |    |   |   |
| UHPC4<br>2.5% SF15<br>0.5% PP            |   |   |   |   |  |  |
| UHPC5<br>1.5% SF15<br>1% SF6<br>0.5% PVA |  |  |  |  |                                                                                      |                                                                                      |
| UHPC6<br>2.5% SF15<br>0.5% PVA           |  |  |  |  |                                                                                      |                                                                                      |

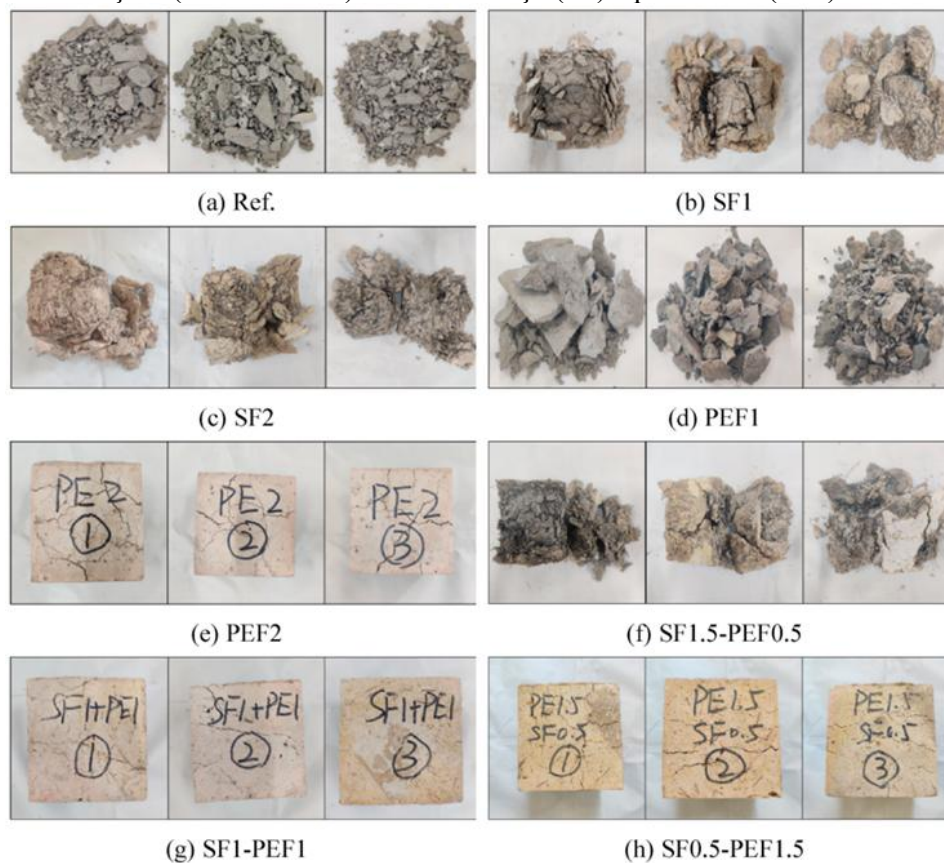
Fonte: Huang *et al.* (2025).

Dessa forma, também é possível notar que as dosagens de 2 % de aço e 0,3 % de PP, proposta por Lin *et al.* (2024b), e de 2,5 % de aço e 0,5 % de PP, apresentada por Huang *et al.* (2025), obtiveram excelentes desempenhos contra o deslocamento explosivo, de modo que esta faixa pode ser considerada ideal para preveni-lo sem prejudicar sua resistência mecânica residual.

Ademais, há estudos empregando outros tipos de fibras sintéticas no UHPC, como a pesquisa de Han *et al.* (2025), que aplicou polietileno e testou o deslocamento explosivo a 1000 °C, como vê-se na Figura 22.

Com base na Figura 22, observa-se que, a princípio, as amostras de UHPC sem fibras e apenas com fibras de aço sofreram com o deslocamento explosivo a 1000 °C, como já era previsto. Além disso, percebe-se que o corpo de prova apenas com 1 % de polietileno se rompeu, enquanto aquele com 2 % resistiu, já apontando a eficácia deste polímero. Por fim, nota-se que as fibras híbridas com 1 % ou mais de polímeros também foram eficientes prevenindo o *spalling*, indicando que esta é uma concentração apropriada e confirmando que o polietileno é viável a fim de prevenir esta falha, embora haja necessidade de mais pesquisas.

Figura 22 - Resultados dos testes de deslocamento explosivo das amostras com diferentes concentrações (% em volume) de fibras de aço (SF) e polietileno (PEF) a 1000 °C.

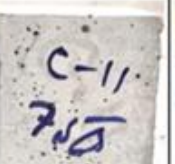
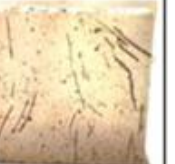


Fonte: Han *et al.* (2025)

Além das fibras sintéticas, outros tipos podem ser empregados no UHPC a fim de mitigar o deslocamento explosivo, como as fibras de basalto, que foram estudadas por Khan *et al.* (2024), como observa-se na Figura 23.

Como nota-se na Figura 23, a amostra de UHPC sem fibras (U) teve deslocamento a partir dos 500 °C, enquanto aquela com 1,5 % de fibra de aço e 0,5 % de fibra de basalto resistiu mesmo a 1000 °C. Além disso, o estudo também testou concreto com 2 % de fibras de aço, que também falhou a 500 °C, e com combinação de 1% de fibras de aço e basalto, o qual não sofreu *spalling*, reforçando que o aço é ineficaz quando é aplicado sozinho e apontando o basalto como mais uma opção para evitar esse tipo de ruptura do UHPC, mas que precisa de mais investigação.

Figura 23 - Observação do deslocamento em amostras de UHPC sem fibras e com fibras híbridas de aço (ST) e basalto (BF) a elevadas temperaturas.

|               | AT                                                                                  | 250°C                                                                               | 500°C                                                                               | 750°C                                                                                | 1000°C                                                                                |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| U             |   |   |   |   |   |
| U-1.5ST+0.5BF |  |  |  |  |  |

Fonte: Khan *et al.* (2024).

#### 4.5. MATERIAIS SUSTENTÁVEIS E ALTERNATIVOS

No contexto do desenvolvimento sustentável, há muitos estudos voltados à adição de fibras naturais e recicladas ao UHPC (Chen *et al.*, 2024; Le Lee, Tan, 2025; Ren, Gao, Zhang, 2022; Ridha, 2024; Xie *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2025), a fim de reduzir seu impacto ambiental e torná-lo mais sustentável, sem comprometer o seu desempenho termomecânico. Como exemplo, pode-se citar as pesquisas de Zhao *et al.* (2025), Ren; Gao; Zhang (2022) e Ridha (2024), que utilizaram fibras híbridas de aço-bambu, aço-sisal e aço-

-micro juta (MJ), respectivamente. Estes autores concluíram que as fibras vegetais impediram o *spalling* do concreto até 600 °C, no último, e até 800 °C, nos dois primeiros, como pode-se observar na Tabela 7, na Tabela 8 e na Figura 24.

Tabela 7 - Performance em relação ao *spalling* das amostras de UHPC cúbicas e prismáticas, com diferentes concentrações (% em volume) de fibras de aço (SF) e bambu (BF) do artigo de Zhao *et al.* (2025).

| <b>Spalling aço (SF) + bambu (BF)</b> |                |              |               |               |               |               |
|---------------------------------------|----------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Grupo</b>                          | <b>Formato</b> | <b>25 °C</b> | <b>200 °C</b> | <b>400 °C</b> | <b>600 °C</b> | <b>800 °C</b> |
| 2,0 SF                                | C              | ✓            | ✓             | x             | x             | x             |
|                                       | P              | ✓            | ✓             | ✓             | x             | x             |
| 1,5 SF + 0,5 BF                       | C              | ✓            | ✓             | ✓             | ✓             | ✓             |
|                                       | P              | ✓            | ✓             | ✓             | ✓             | ✓             |
| 1,0 SF + 1,0 BF                       | C              | ✓            | ✓             | ✓             | ✓             | ✓             |
|                                       | P              | ✓            | ✓             | ✓             | ✓             | ✓             |
| 0,5 SF + 1,5 BF                       | C              | ✓            | ✓             | ✓             | ✓             | ✓             |
|                                       | P              | ✓            | ✓             | ✓             | ✓             | ✓             |

Fonte: O autor (2026).

Tabela 8 - Aparência visual das amostras de UHPC com aço e sisal após aquecimento a 800 °C.

| Sinergia das fibras                      |     | Quantidade de fibra de sisal (% em volume)                                          |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                                          |     | 0.0                                                                                 | 0.3                                                                                 | 0.6                                                                                  | 0.9                                                                                   |
| Quantidade de fibra de aço (% em volume) | 0.0 |  |  |  |  |
|                                          | 1.0 |  |  |  |  |
|                                          | 1.5 |  |  |  |  |
|                                          | 2.0 |  |  |  |  |

Fonte: Adaptado de Ren, Gao, Zhang (2022).

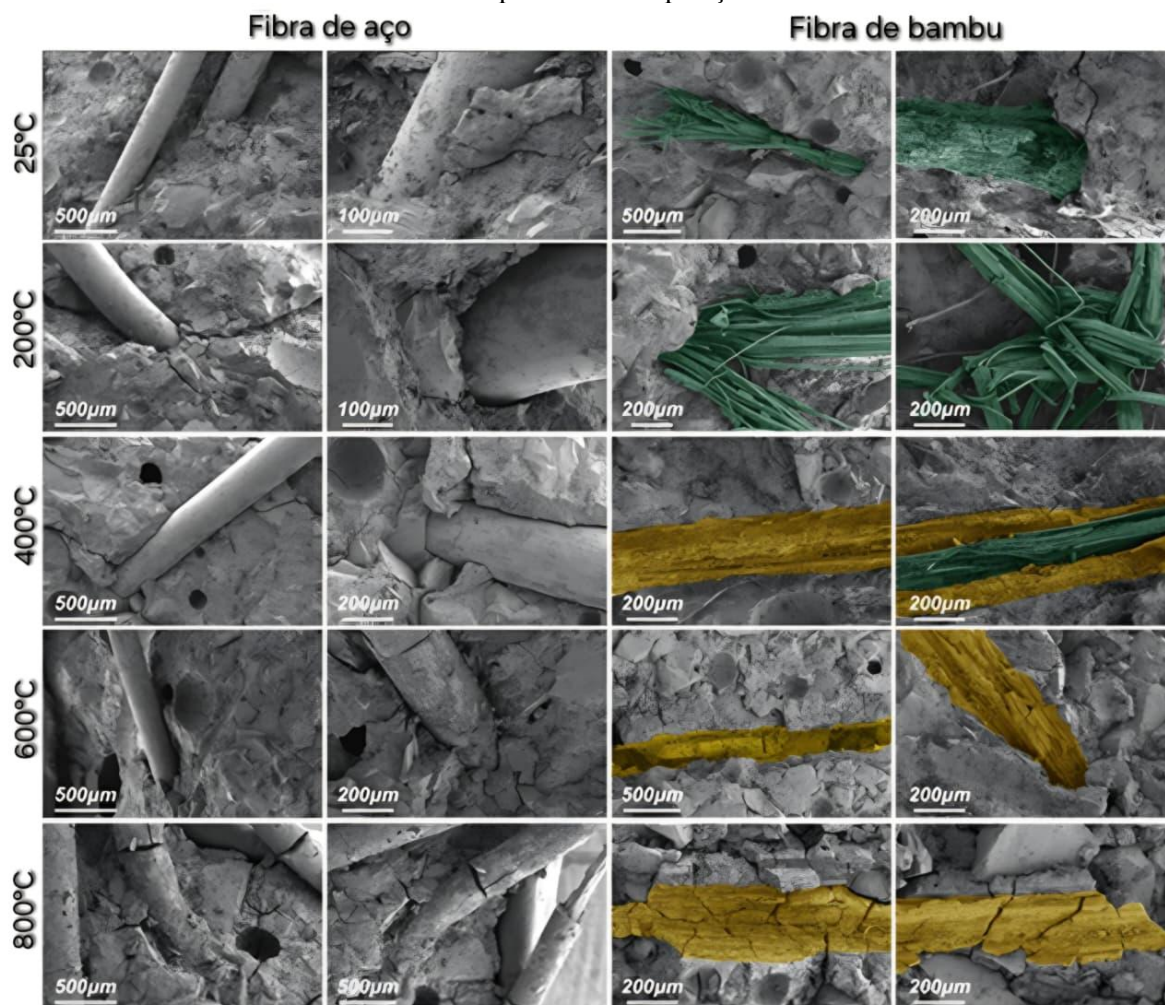
Figura 24 - Amostras de UHPC no forno: (a) antes do aquecimento; (b) após exposição a 600 °C, sendo os corpos de prova atrás aqueles com MJ.



Fonte: Ridha (2024).

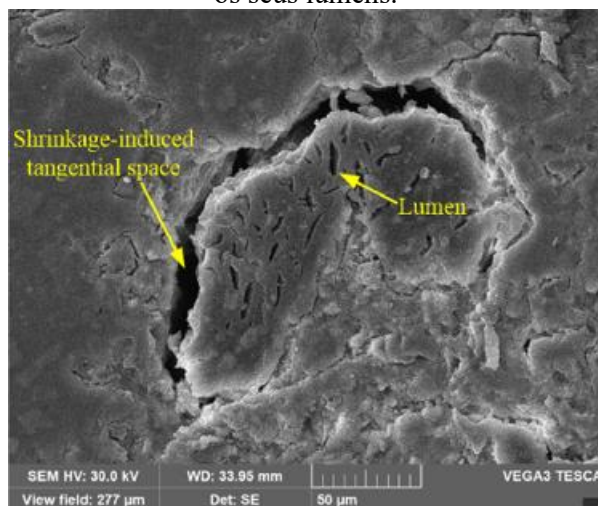
Esse aumento da resistência ao deslocamento explosivo deve-se, sobretudo, à carbonização das fibras, que cria vazios e canais adicionais para o alívio da pressão interna e ocorre gradualmente, pois as fibras vegetais são compostas por diversos componentes como celulose, hemicelulose e lignina que carbonizam em momentos e temperaturas diferentes, como mostrado na Figura 25, e à liberação inicial do vapor através dos lúmens das fibras e dos espaços tangenciais gerados pela retração térmica no início do aquecimento, como é possível observar na Figura 26.

Figura 25 – Imagens SEM indicando a degradação das fibras de aço e bambu conforme o aumento da temperatura de exposição.



Fonte: Adaptado de Zhao *et al* (2025).

Figura 26 – Imagem SEM destacando o espaço tangencial induzido pela retração da fibra de sisal e os seus lúmens.



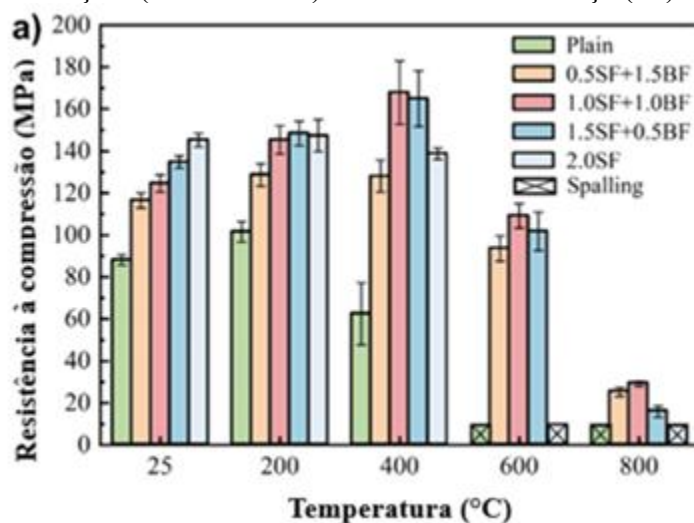
Fonte: Ren, Gao, Zhang (2022).

Ademais, os estudos também testaram as resistências mecânicas residuais à compressão e à flexão das amostras de UHPC com fibras híbridas aço-naturais, como observa-se da Figura 27 à Figura 30.

Com base na Figura 27, nota-se que as resistências à compressão das amostras de UHPC com 1% de fibra de aço e de bambu e daquelas com 1,5% de aço e 0,5% de bambu aumentam até 400 °C, superando aquelas com 2 % de aço, sendo notada redução a partir deste ponto, porém mantendo bom desempenho até 800 °C, apresentando uma tendência similar ao concreto com fibras de aço e sintéticas. Além disso, nota-se na Figura 29a e na Figura 30a que os corpos de prova com sisal e MJ também mantiveram boa resistência sob elevadas temperaturas (800 °C e 600 °C, respectivamente), comprovando a contribuição das fibras naturais para esta propriedade mecânica.

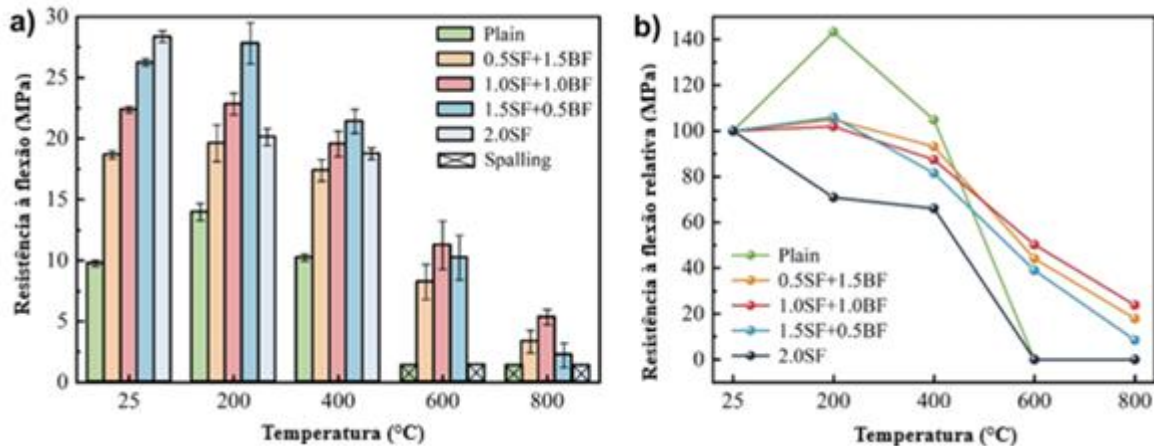
Outrossim, a Figura 28, a Figura 29b e a Figura 30b revelam que os melhores desempenhos a elevadas temperaturas em relação à flexão são dos corpos de prova com fibras híbridas que apresentam maior concentração de aço e quantidades intermediárias de fibras naturais, obtendo-se resistências significativas, mostrando uma tendência semelhante ao UHPC com fibras híbridas aço-sintéticas. Desse modo, nota-se que as fibras orgânicas também são uma adição viável para elementos de UHPC sob flexão, mas não devem ser utilizadas em altas porcentagens a fim de não prejudicar o desempenho mecânico.

Figura 27 - Resistência residual à compressão das amostras de UHPC sem fibras (*plain*) e com diferentes concentrações (% em volume) de fibras híbridas de aço (SF) e bambu (BF).



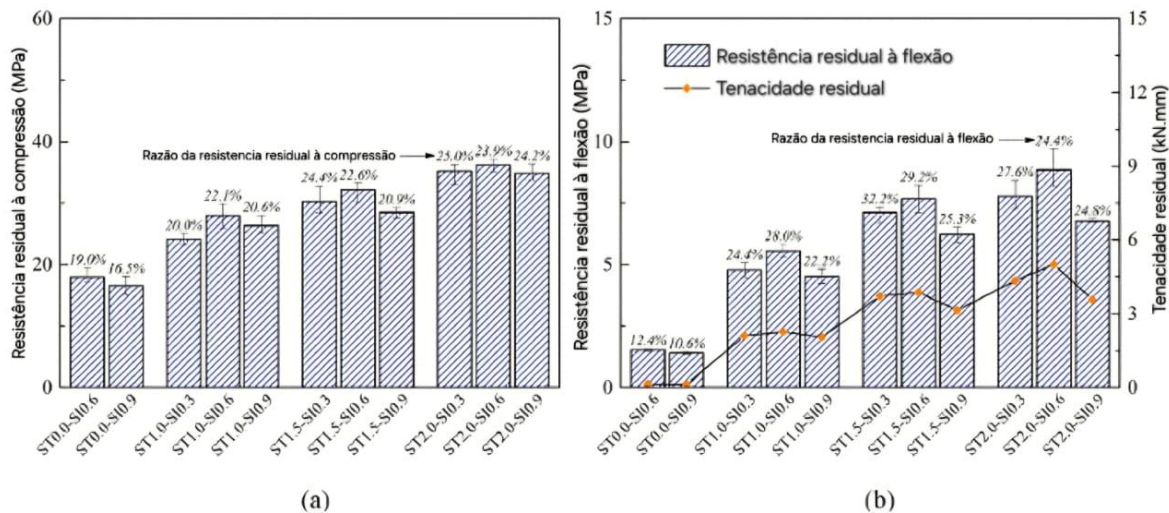
Fonte: Adaptado de Zhao *et al.* (2025).

Figura 28 - Resistência residual à flexão do UHPC sem fibras (*plain*) e com diferentes concentrações (% em volume) de fibras de aço (SF) e bambu (BF) a diferentes temperaturas: a) resistência à flexão absoluta; b) resistência à flexão relativa (normalizada como 100% a 25 °C).



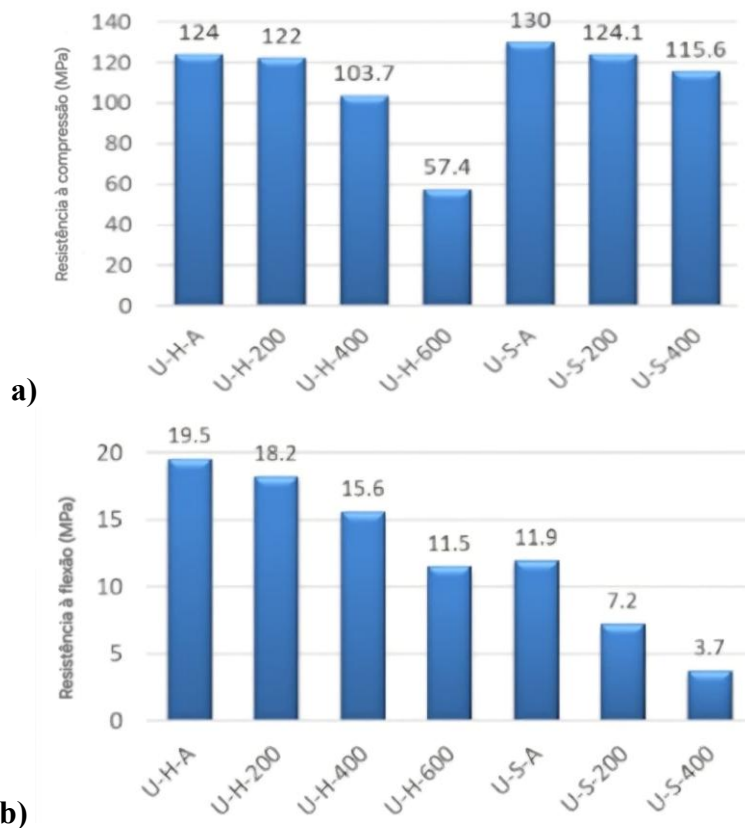
Fonte: Adaptado de Zhao *et al.* (2025).

Figura 29 - Resistência mecânica residual, a 800 °C dos corpos de prova com diferentes concentrações (% em volume) de fibras híbridas de aço (ST) e sisal (SI): a) compressão; b) flexão e tenacidade.



Fonte: Adaptado de Ren; Gao; Zhang (2022).

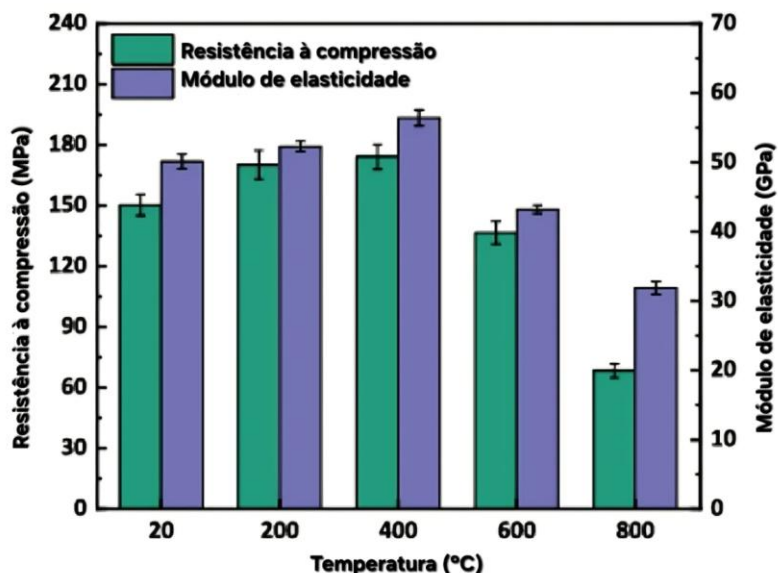
Figura 30 - Resistência mecânica residual dos corpos de prova com 2 % de fibras de aço e 0,5 % de MJ (U-H) e sem as últimas (U-S) em temperaturas de 25 °C (ambiente – A) a 600 °C: a) compressão; b) flexão.



Fonte: Adaptado de Ridha (2024).

Além disso, também há estudos acerca do emprego de fibras de materiais reciclados no UHPC, promovendo sua reutilização, como o aço, que é a fibra mais empregada nesse tipo de concreto, e foi empregada no estudo de Chen *et al.* (2024), proveniente de uma empresa chinesa de reciclagem de pneus, juntamente com fibras de PP. Nessa pesquisa, foram utilizadas amostras com 3 % de aço reciclado e 0,9 % de polímero, obtendo-se bons resultados para a resistência residual à compressão e para o módulo de elasticidade residual até 800 °C, sem sofrer deslocamento explosivo, como percebe-se pela Figura 31.

Figura 31 – Resistência residual à compressão e módulo de elasticidade residual do UHPC com aço reciclado e polipropileno.



Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2024).

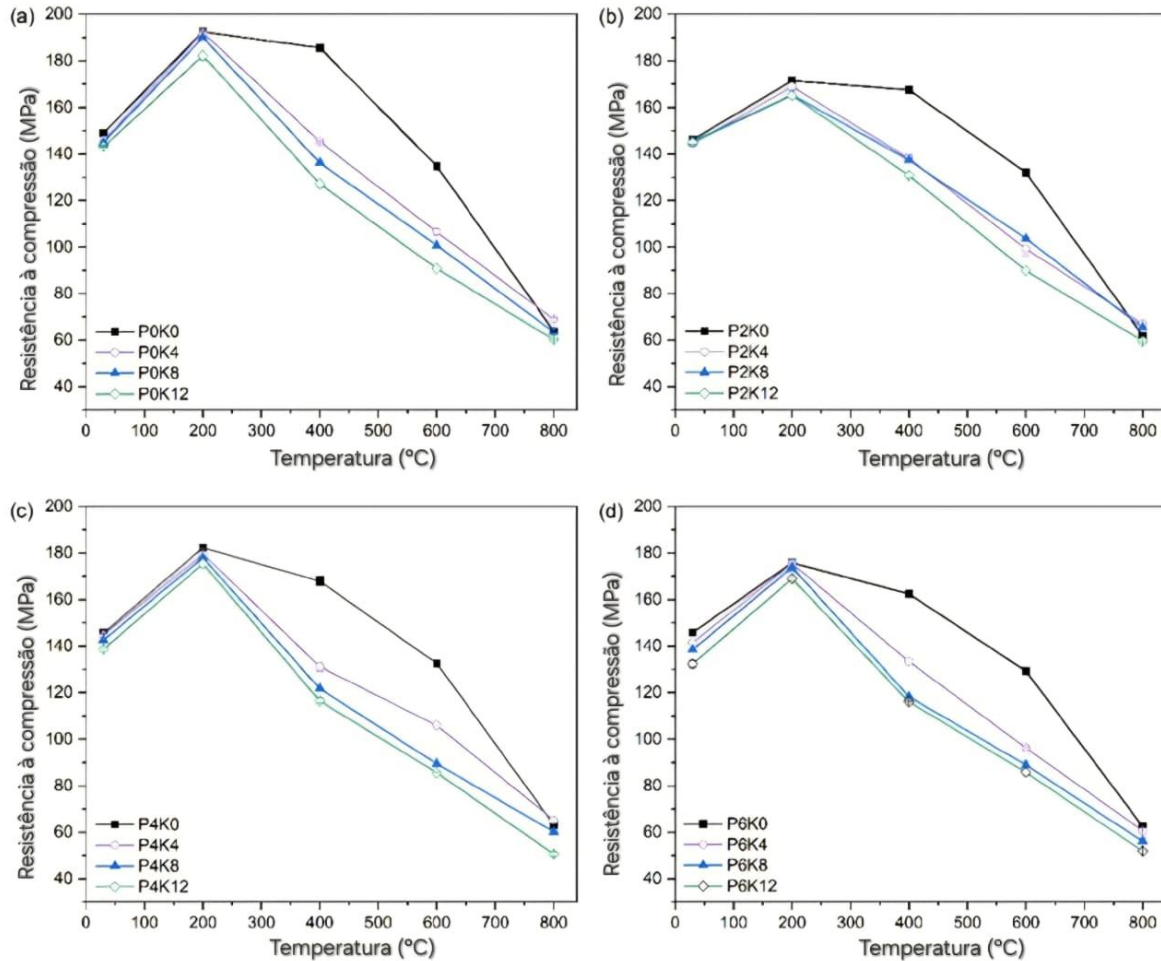
Por fim, pode-se citar o artigo de Le Lee, Tan (2025), que difere por não empregar fibras de aço no UHPC, adicionando fibras de PP reciclado, obtidas de resíduos sólidos urbanos, e kenaf, que foram tratados para remover impurezas. Após os testes, verificou-se que os corpos com fibras híbridas com concentrações a partir de 6 kg/m<sup>3</sup> (0,4 %) de PP reciclado e 4 kg/m<sup>3</sup> (0,3 %) de kenaf não sofreram deslocamento explosivo, pois somou-se a dilatação e a fusão das fibras sintéticas com a retração das fibras naturais, aumentando a porosidade e reduzindo a pressão interna, e que foram alcançadas boas resistências residuais à compressão e à flexão, como vê-se na Tabela 9, na Figura 32 e na Figura 33.

Tabela 9 - Comportamento do deslocamento explosivo dos corpos de prova de UHPC com fibras de PP reciclado e kenaf expostos a elevadas temperaturas.

| Mistura de fibras                                        |   | Quantidade de fibra de kenaf (kg/m <sup>3</sup> )                                   |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|----------------------------------------------------------|---|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                          |   | 0                                                                                   | 4                                                                                   | 8                                                                                    | 12                                                                                    |
| Quantidade de fibra de PP reciclado (kg/m <sup>3</sup> ) | 0 |    |    |    |    |
|                                                          | 2 |    |    |    |    |
|                                                          | 4 |   |   |   |   |
|                                                          | 6 |  |  |  |  |

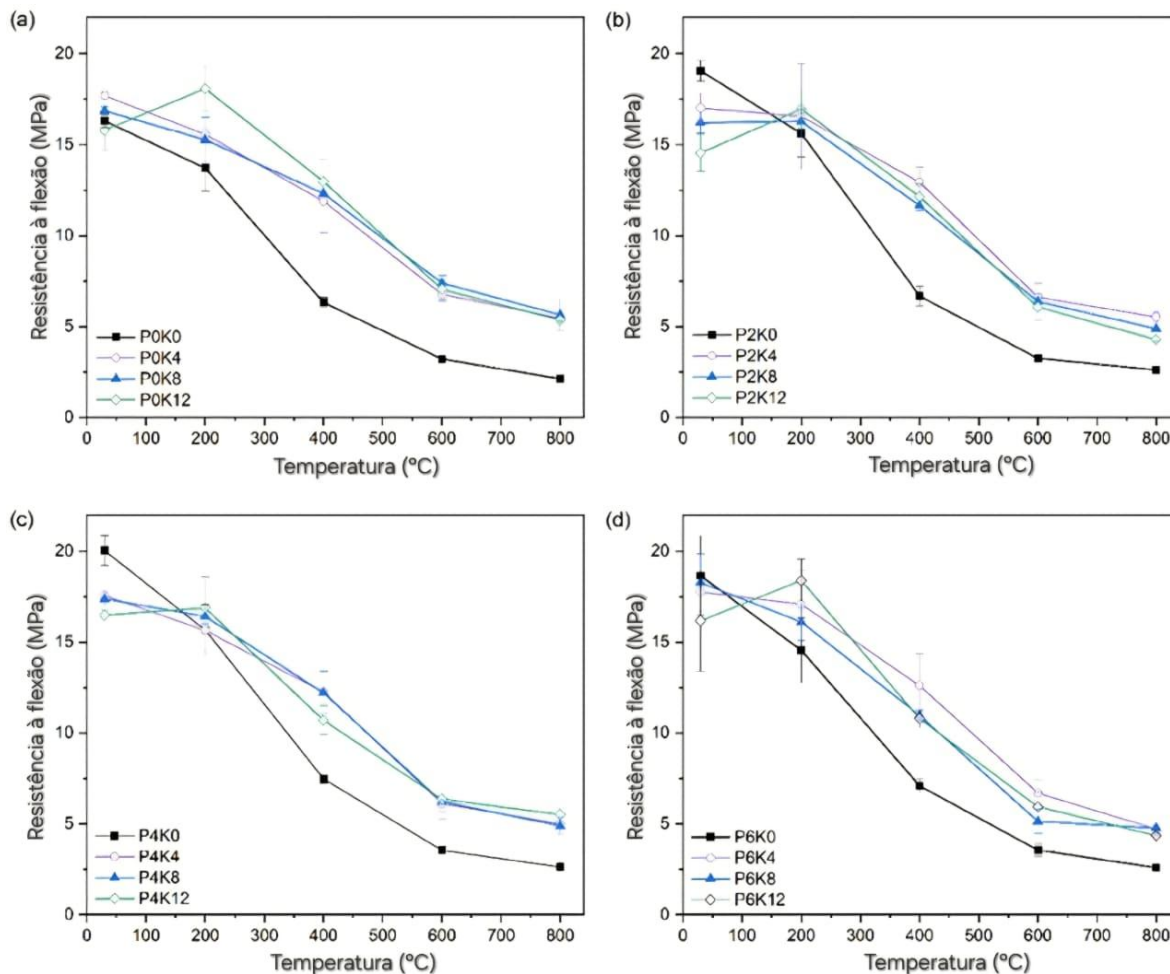
Fonte: Adaptado de Le Lee, Tan (2025).

Figura 32 - Resistência residual à compressão após o aquecimento dos corpos de prova de UHPC com concentrações de 0, 4 (0,3 %), 8 (0,5 %) e 12 kg/m<sup>3</sup> (0,8 %) de fibras de kenaf (K): (a) 0; (b) 2 (0,2 %); (c) 4 (0,4 %); (d) 6 kg/m<sup>3</sup> (0,7 %) de fibras de PP reciclado (P).



Fonte: Adaptado de Le Lee, Tan (2025).

Figura 33 - Resistência residual à flexão após o aquecimento dos corpos de prova de UHPC com concentrações de 0, 4 (0,3 %), 8 (0,5 %) e 12 kg/m<sup>3</sup> (0,8 %) de fibras de kenaf (K): (a) 0; (b) 2 (0,2 %); (c) 4 (0,4 %); (d) 6 kg/m<sup>3</sup> (0,7 %) de fibras de PP reciclado (P).



Fonte: Adaptado de Le Lee, Tan (2025).

Vê-se, portanto, que, embora sejam necessárias mais pesquisas acerca desse tema, a adição de fibras naturais e recicladas ao UHPC é inovadora e demonstra ser uma alternativa para reduzir o impacto ambiental da construção civil sem comprometer sua segurança e eficiência estruturais.

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi realizada uma revisão sistemática da literatura existente acerca das propriedades termomecânicas e da microestrutura do concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras (UHPC) submetido a elevadas temperaturas, focando no efeito do tipo e da concentração das fibras empregadas e da temperatura de exposição no seu desempenho. Com base nas análises conduzidas, chegou-se às seguintes conclusões:

- As resistências residuais à compressão, à tração e à flexão e o módulo de elasticidade residual do UHPC aumentam até aproximadamente a faixa entre 200 °C e 400 °C, dependendo dos tipos de fibras empregados, devido à hidratação adicional do cimento, pois esta densifica a matriz do concreto, e, em seguida, decrescem continuamente com a elevação da temperatura;
- A resistência mecânica do UHPC é ligada, especialmente, às fibras de aço, que, por conseguinte, são as mais empregadas nesse concreto, porém as amostras que as empregam exclusivamente são mais sensíveis ao deslocamento explosivo e possuem 800 °C como temperatura crítica, exceto as que utilizam aço refratário;
- As fibras híbridas aço-sintéticas são a solução mais usual para o *spalling* do UHPC, pois as últimas aumentam a porosidade e a permeabilidade do concreto, permitindo o alívio da pressão interna, além de contribuírem para uma melhora significativa das propriedades mecânicas quando utilizados em quantidades moderadas;
- As fibras de polipropileno (PP) são as fibras sintéticas com melhor performance contra o *spalling* do UHPC, dado que possuem baixo ponto de fusão e alto coeficiente de dilatação térmica, formando microfissuras, macroporos e canais na matriz interna do concreto que reduzem a tensão interna e o risco de deslocamento explosivo;
- Os tipos e as concentrações das fibras empregadas afetam as resistências à compressão, à tração, à flexão e ao *spalling* e o módulo de elasticidade do UHPC sob elevadas temperaturas;
- As fibras híbridas melhoram a performance do UHPC sob altas temperaturas pelo efeito sinérgico dos diferentes tipos e concentrações de fibras;

- As fibras naturais e recicladas são uma alternativa viável para mitigar o *spalling* do UHPC a elevadas temperaturas e torná-lo mais sustentável, além de melhorarem significativamente a sua performance mecânica, embora haja necessidade de mais pesquisas acerca do seu uso, a fim de comparar resultados e definir aquelas que possuem os melhores desempenhos termomecânicos;
- Pesquisas futuras poderiam aprofundar os efeitos de fibras sintéticas menos usuais no UHPC, como nylon e polietileno, e de outros tipos de fibras, como as de basalto, a fim de diversificar as possibilidades de aplicação;
- Também seria interessante a realização de ensaios em elementos estruturais de UHPC, como vigas e pilares, em trabalhos futuros, com o intuito de investigar o seu comportamento em obras de Engenharia e situações mais práticas.

## REFERÊNCIAS

- ABADEL, Aref A.; ALHARBI, Yousef R. Confinement effectiveness of CFRP strengthened ultra-high performance concrete cylinders exposed to elevated temperatures. **Mater Sci**, v. 39, p. 478-490, 2021. Acesso em: 26 mar. 2026;
- ABADEL, Aref A.; KHAN, M. Iqbal; MASMOUDI, Radhouane. Influence of elevated temperature on the engineering properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. **Materials Science-Poland**, v. 41, n. 1, p. 140-160, 2023. Acesso em: 26 mar. 2026;
- AGRAWAL, Sohit *et al.* Behavior of unconfined steel-fiber reinforced UHPC post high-temperature exposure. **Case Studies in Construction Materials**, v. 22, p. e04173, 2025. Acesso em: 26 mar. 2026;
- ARABANI, Akbar Shahidzadeh; NASERABADI, Heydar Dashti; AMINYAVARI, Saleh. Experimental investigation of energy absorption in fiber-reinforced ultra-high-performance concrete after exposure to elevated temperatures. **Case Studies in Construction Materials**, v. 22, p. e04451, 2025. Acesso em: 26 mar. 2026;
- ARUNOTHAYAN, Arun R.; SANJAYAN, Jay G. Elevated temperature effects on 3D printed ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 367, p. 130241, 2023. Acesso em: 26 mar. 2026;
- ASHTYAT, Ahmed *et al.* Behavior of ultra-high-performance concrete under elevated temperatures: A comprehensive review of mechanical, physical, thermal, and microstructural properties. **Results in Engineering**, v. 26, p. 104960, 2025;
- CHEN, Meng *et al.* Effect of elevated temperatures on behaviour of recycled steel and polypropylene fibre reinforced ultra-high performance concrete under dynamic splitting tension. **Journal of Building Engineering**, v. 84, p. 108586, 2024. Acesso em: 26 mar. 2026;
- CHEN, Tao *et al.* Experimental study on the mechanical and fire resistance properties of sprayed ultra-high-performance concrete (SUHPC) under different polypropylene fiber content. **Construction and Building Materials**, v. 512, p. 145405, 2026. Acesso em: 26 mar. 2026;
- CHRIST, Roberto *et al.* Evaluation of ultra-high-performance concrete columns at high temperatures after 180 days of curing. **Buildings**, v. 13, n. 9, p. 2254, 2023. Acesso em: 26 mar. 2026;

DONG, Liang *et al.* Microstructure and mechanical behaviour of 3D printed ultra-high performance concrete after elevated temperatures. **Additive Manufacturing**, v. 58, p. 103032, 2022. Acesso em: 26 mar. 2026;

ELHEFNY, R. A. *et al.* Thermal Degradation and Microstructural Evolution of Geopolymer-Based UHPC with Silica Fume and Quartz Powder, **Infrastructures** (Basel) 10 (2025);

GAO, Danying *et al.* Effect of steel fiber on the compressive performance and microstructure of ultra-high performance concrete at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 435, p. 136830, 2024. Acesso em: 26 mar. 2026;

HAN, Zhen *et al.* Non-explosive spalling UHPC mediated by synergistic regulation of thermal stress and vapor pressure. **Composites Part B: Engineering**, v. 305, p. 112712, 2025. Acesso em: 26 mar. 2026;

HUANG, Junjie *et al.* Mechanical and bond-slip behaviour of ultra-high performance concrete exposed to high temperature. In: **Structures**. Elsevier, 2025. p. 110259. Acesso em: 26 mar. 2026;

HUANG, Lei *et al.* Material property and constitutive model of C120 hybrid fiber ultra-high performance concrete at elevated temperatures. In: **Structures**. Elsevier, 2023. p. 373-386. Acesso em: 26 mar. 2026;

HUNG, Chung-Chan; YULIANTI, Erika; AGRAWAL, Sohit. Microstructures, durability, and mechanical behavior of hybrid steel and PP fiber reinforced UHPC at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 447, p. 138208, 2024;

KHAN, Mehran *et al.* Influence of high temperatures on the mechanical and microstructural properties of hybrid steel-basalt fibers based ultra-high-performance concrete (UHPC). **Construction and Building Materials**, v. 411, p. 134387, 2024. Acesso em: 26 mar. 2026;

KONG, Wenyan *et al.* Mechanical properties of steel-polypropylene fiber reinforced UHPC after elevated temperature at rapid heating rate. **Journal of Building Engineering**, p. 113466, 2025. Acesso em: 26 mar. 2026;

LE LEE, Kevin Jia; TAN, Kang Hai. Effects of hybrid recycled polypropylene and natural kenaf fibres on spalling prevention of ultra-high performance concrete at elevated temperatures. **Cement and Concrete Composites**, p. 106304, 2025. Acesso em: 26 mar. 2026;

LIN, Junfu *et al.* Impact of synthetic fibers on spalling and intrinsic pore structure of ultra-high performance concrete (UHPC) under elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 439, p. 137325, 2024b. Acesso em: 26 mar. 2026;

LIN, Junfu *et al.* Influence of synthetic fibers on the performance of ultra-high performance concrete (UHPC) at elevated temperatures. **Journal of Building Engineering**, v. 97, p. 110735, 2024a. Acesso em: 26 mar. 2026;

MA, Wei *et al.* Constitutive model and deterioration mechanisms of uniaxial compressive behavior for calcium aluminate cement-based UHPC under simulated fire temperatures. **Journal of Building Engineering**, v. 98, p. 111349, 2024. Acesso em: 26 mar. 2026;

MEZZAL, Saif K.; AL-AZZAWI, Zaid; NAJIM, Khalid B. Failure modes of self-compacting concrete beams reinforced with discarded steel fiber under fire conditions. **Engineering Structures**, v. 333, p. 120198, 2025. Acesso em: 26 mar. 2026;

REN, Guosheng; GAO, Xiaojian; ZHANG, Hongzhi. Utilization of hybrid sisal and steel fibers to improve elevated temperature resistance of ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 130, p. 104555, 2022. Acesso em: 26 mar. 2026;

RIDHA, Maha MS. Combined effect of natural fibre and steel fibre on the thermal-mechanical properties of UHPC subjected to high temperature. **Cement and Concrete Research**, v. 180, p. 107510, 2024. Acesso em: 26 mar. 2026;

RUI, Zi-Qing *et al.* Enhancing high-temperature spalling resistance and residual mechanical properties of UHPC: The combined role of polypropylene fibers and metakaolin. **Journal of Building Engineering**, p. 114305, 2025;

WANG, Dong *et al.* Optimized fire resistance of alkali-activated high-performance concrete by steel fiber. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 150, n. 15, p. 11517-11529, 2025a. Acesso em: 26 mar. 2026;

WANG, Tan *et al.* Residual properties of ultra-high performance concrete containing steel-polypropylene hybrid fiber exposed to elevated temperature at early age. **Journal of Building Engineering**, v. 99, p. 111507, 2025b. Acesso em: 26 mar. 2026;

XIE, Yuekai *et al.* Improved mechanical and thermal properties of sustainable ultra-high performance geopolymer concrete with cellulose nanofibres. **Journal of Building Engineering**, v. 102, p. 112068, 2025. Acesso em: 26 mar. 2026;

ZHANG, Tong *et al.* Mitigating the damage of ultra-high performance concrete at elevated temperatures using synergistic flame-retardant polymer fibres. **Cement and Concrete Research**, v. 158, p. 106835, 2022. Acesso em: 26 mar. 2026;

ZHANG, Yao *et al.* Effect of microfibers and cenospheres on the interfacial performance between steel fiber and multi-scale fiber reinforced UHPC subjected to high temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 478, p. 141435, 2025;

ZHAO, Hua *et al.* Temperature-adaptive mechanism of bamboo fibers for regulating elevated temperature performance of UHPC. **Construction and Building Materials**, v. 471, p. 140674, 2025. Acesso em: 26 mar. 2026.

## APÊNDICE A - Informações sobre os artigos selecionados para a pesquisa

| Apêndice                                                                                                                                                   |                             |      |                                     |                             |                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------|
| Título                                                                                                                                                     | Autores                     | Ano  | Publicação                          | Tipos de fibra              | Temp. máx. (°C) |
| Effect of steel fiber on the compressive performance and microstructure of ultra-high performance concrete at elevated temperatures                        | Gao, Danying <i>et al.</i>  | 2024 | Construction and building materials | aço                         | 1000            |
| Temperature-adaptive mechanism of bamboo fibers for regulating elevated temperature performance of UHPC                                                    | Zhao, Hua <i>et al.</i>     | 2025 | Construction and building materials | aço e bambu                 | 800             |
| Influence of synthetic fibers on the performance of ultra-high performance concrete (UHPC) at elevated temperatures                                        | Lin, Junfu <i>et al.</i>    | 2024 | Journal of Building Engineering     | aço, PP, NY, PVA, PAN e PET | 1050            |
| Constitutive model and deterioration mechanisms of uniaxial compressive behavior for calcium aluminate cement-based UHPC under simulated fire temperatures | Ma, Wei <i>et al.</i>       | 2024 | Journal of Building Engineering     | aço refratário              | 1200            |
| Mechanical properties of steel-polypropylene fiber reinforced UHPC after elevated temperature at rapid heating rate                                        | Kong, Wenyuan <i>et al.</i> | 2025 | Journal of Building Engineering     | aço e PP                    | 600             |
| Influence of high temperatures on the mechanical and microstructural properties of hybrid steel-basalt fibers based ultra-high-performance concrete (UHPC) | Khan, Mehran <i>et al.</i>  | 2024 | Construction and building materials | aço e basalto               | 1000            |
| Impact of synthetic fibers on spalling and intrinsic pore structure of ultra-high performance concrete (UHPC) under elevated temperatures                  | Lin, Junfu <i>et al.</i>    | 2024 | Construction and building materials | aço, PET, PP, NY, PVA e PAN | 1050            |

|                                                                                                                                                      |                                                                          |      |                                             |                      |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------|---------------------------------------------|----------------------|------|
| Microstructures, durability, and mechanical behavior of hybrid steel and PP fiber reinforced UHPC at elevated temperatures                           | Hung, Chung-Chan; Yulianti, Erika; Agrawal, Sohit                        | 2024 | Construction and building materials         | aço e PP             | 1000 |
| Influence of elevated temperature on the engineering properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete                                  | Abadel, Aref A.; Khan, M. Iqbal; Masmoudi, Radhouane                     | 2023 | Materials Science-Poland                    | aço, PP e PVA        | 400  |
| Combined effect of natural fibre and steel fibre on the thermal-mechanical properties of UHPC subjected to high temperature                          | Ridha, Maha MS                                                           | 2024 | Cement and Concrete Research                | MHS, MSS e MJ        | 600  |
| Utilization of hybrid sisal and steel fibers to improve elevated temperature resistance of ultra-high performance concrete                           | Ren, Guosheng; Gao, Xiaojian; Zhang, Hongzhi                             | 2022 | Cement and Concrete Composites              | Aço e sisal          | 800  |
| Non-explosive spalling UHPC mediated by synergistic regulation of thermal stress and vapor pressure                                                  | Han, Zhen <i>et al.</i>                                                  | 2025 | Composites Part B: Engineering              | aço e polietileno    | 800  |
| Behavior of unconfined steel-fiber reinforced UHPC post high-temperature exposure                                                                    | Agrawal, Sohit <i>et al.</i>                                             | 2025 | Case Studies in Construction Materials      | aço                  | 300  |
| Experimental investigation of energy absorption in fiber-reinforced ultra high-performance concrete after exposure to elevated temperatures          | Arabani, Akbar Shahidzadeh; Naserabadi, Heydar Dashti; Aminyavari, Saleh | 2025 | Case Studies in Construction Materials      | aço, PP e PVA        | 800  |
| Effects of hybrid recycled polypropylene and natural kenaf fibres on spalling prevention of ultra-high performance concrete at elevated temperatures | Le Lee, Kevin Jia; Tan, Kang Hai                                         | 2025 | Cement and Concrete Composites              | PP reciclado e kenaf | 800  |
| Optimized fire resistance of alkali-activated high-performance concrete by steel fiber                                                               | Wang, Dong <i>et al.</i>                                                 | 2025 | Journal of Thermal Analysis and Calorimetry | aço                  | 800  |

|                                                                                                                                                                    |                                        |      |                                     |                                       |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------|-------------------------------------|---------------------------------------|------|
| Residual properties of ultra-high performance concrete containing steel-polypropylene hybrid fiber exposed to elevated temperature at early age                    | Wang, Tan <i>et al.</i>                | 2025 | Journal of Building Engineering     | aço e PP                              | 800  |
| Confinement effectiveness of CFRP strengthened ultra-high performance concrete cylinders exposed to elevated temperatures                                          | Abadel, Aref A.; Alharbi, Yousef R.    | 2022 | Materials Science-Poland            | aço, PP e PVA                         | 400  |
| Mitigating the damage of ultra-high performance concrete at elevated temperatures using synergistic flame-retardant polymer fibres                                 | Zhang, Tong <i>et al.</i>              | 2022 | Cement and Concrete Research        | fibras orgânicas e modificadas (SFRP) | 800  |
| Effect of elevated temperatures on behaviour of recycled steel and polypropylene fibre reinforced ultra-high performance concrete under dynamic splitting tension  | Chen, Meng <i>et al.</i>               | 2024 | Journal of Building Engineering     | aço reciclado e PP                    | 800  |
| Material property and constitutive model of C120 hybrid fiber ultra-high performance concrete at elevated temperatures                                             | Huang, Lei <i>et al.</i>               | 2023 | Structures                          | aço e PP                              | 800  |
| Mechanical and bond-slip behaviour of ultra-high performance concrete exposed to high temperature                                                                  | Huang, Junjie <i>et al.</i>            | 2025 | Structures                          | Aço, PVA e PP                         | 1000 |
| Experimental study on the mechanical and fire resistance properties of sprayed ultra-high-performance concrete (SUHPC) under different polypropylene fiber content | Chen, Tao <i>et al.</i>                | 2026 | Construction and building materials | aço e PP                              | 700  |
| Elevated temperature effects on 3D printed ultra-high performance concrete                                                                                         | Arunothayan, Arun R.; Sanjayan, Jay G. | 2023 | Construction and building materials | Aço, PVA e PP                         | 1000 |

|                                                                                                                                |                                                    |      |                                 |                             |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------|---------------------------------|-----------------------------|-----|
| Failure modes of self-compacting concrete beams reinforced with discarded steel fiber under fire conditions                    | Mezzal, Saif K.; Al-Azzawi, Zaid; Najim, Khalid B. | 2025 | Engineering Structures          | Aço                         | 600 |
| Improved mechanical and thermal properties of sustainable ultra-high performance geopolymer concrete with cellulose nanofibres | Xie, Yuekai <i>et al.</i>                          | 2025 | Journal of Building Engineering | Aço e nanofibra de celulose | 600 |
| Evaluation of Ultra-High-Performance Concrete Columns at High Temperatures after 180 Days of Curing                            | Christ, Roberto <i>et al.</i>                      | 2023 | Buildings                       | Aço e PVA                   | 600 |

Fonte: O autor (2026).